

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# **Μη Γραμμική Ανάλυση Αργιλικών Εδαφών υπό Σεισμική Φόρτιση**

Non-linear Analysis of Clays under Seismic Load

**ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ**

**ΓΙΑΛΑΜΙΔΟΥ ΔΩΡΟΘΕΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**Κ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ**

Βόλος, Μάρτιος 2017

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εδαφοδυναμική και συγκεκριμένα το κομμάτι που περιλαμβάνει τη σχέση του δείκτη πλαστικότητας με το μέτρο διάτμησης και το λόγο απόσβεσης των αργιλικών σχηματισμών. Βάση της εργασίας είναι μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 1991 από τους Mladen Vucetic και Ricardo Dobry. Από την έρευνα αυτή εξάχθηκαν κάποιες καμπύλες που αντιπροσώπευαν τη συμπεριφορά των δυναμικών χαρακτηριστικών των αργίλων ανάλογα με το μέγεθος της πλαστικότητάς τους. Έχοντας ως βάση αυτές τις καμπύλες, πραγματοποιήθηκε στην εργασία μία βαθμονόμηση ενός αναλυτικού μη γραμμικού προσομοιώματος υστερητικής συμπεριφοράς για μονοτονική και ανακυκλική φόρτιση, το οποίο αναπαράγει τις καμπύλες αυτές μέσω των χαρακτηριστικών βρόγχων υστέρησης που δημιουργεί. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκε ένα μοντέλο από τη δυναμική ανάλυση του προγράμματος FLAC, το sig3. Σε πρώτη φάση το μοντέλο εφαρμόστηκε στο πρόγραμμα Mathematica, μέσω του οποίου έγινε προσπάθεια να ταυτιστούν οι καμπύλες της πειραματικής έρευνας του 1991 με αυτές του μοντέλου. Οι καμπύλες του μοντέλου δημιουργήθηκαν δίνοντας τιμές στις παραμέτρους του  $a$ ,  $b$  και  $\alpha$ . Οι αριθμητικές τιμές με βάση τις οποίες οι καμπύλες ταυτίζονταν όσο το δυνατόν περισσότερο επιλέχθηκαν και αποτελούν και ένα κομμάτι των αποτελεσμάτων της εργασίας. Στη συνέχεια οι αριθμητικές τιμές των συνιστωσών του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν σε μία δοκιμή άμεσης διάτμησης ενός δοκιμίου για να καταστεί πιο ξεκάθαρη η χρησιμότητά τους. Τα αποτελέσματα της εργασίας εμφανίζονται σε διαγράμματα και πίνακες, που περιλαμβάνουν τις καμπύλες και τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου, καθώς και διαγράμματα που απεικονίζουν τα αποτελέσματα της άμεσης διάτμησης.

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with soil dynamics and more specifically with the part that includes the relation between shear modulus, damping ratio and plasticity index of clays. The base of the diploma thesis is a research that was published in 1991 and was conducted by Mladen Vucetic and Ricardo Dobry. This research included as results some curves that indicated the behavior of the dynamics characteristics of clays, depending on their plasticity index. Having these curves in mind, there was an effort to create them through another procedure and then to compare them. This effort was based on a method that is called calibration. In this case in order to create the curves a model that belongs to the geotechnical program FLAC, was used. The name of the model is sig3. Initially, the model was applied in the program Mathematica, in order to match the curves that occurred from the research in 1991 with those which were created from the model. The model sig3 has three parameters named a, b and xo and the curves of the model were produced by giving various values to these three parameters. The values from which the two curves were best matched were kept and they were a big part of the final results. Subsequently, the values of the parameters of the model sig3 were used in order to conduct a simple shear test on a clay sample. This test was conducted in the geotechnical program FLAC and it made clearer the use of the results from the Mathematica program. The results are shown in diagrams and tables, which include the curves and the numerical values of the parameters, as well as the results from the shear strain.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θέλω να ευχαριστήσω πρώτα από όλους τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, τον κύριο Παναγιώτη Ντακούλα, καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθειά του όλο αυτό το διάστημα που εργαζόμουν πάνω στην εργασία. Με την καθοδήγηση και την εμπειρία του ξεπέρασα όλα τα προβλήματα που αντιμετώπισα και εμπλούτισα τις γνώσεις μου.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου τον κύριο Εφραιμίδη Γ. και την κυρία Καλλιόγλου Π. για την ανάγνωση της εργασίας και τις υποδείξεις τους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω ολόψυχα τους γονείς μου για την υπομονή τους και την υποστήριξή τους καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου και σε αυτούς αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία.

ΓΙΑΛΑΜΙΔΟΥ ΔΩΡΟΘΕΑ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Ορισμός του προβλήματος .....	9
1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	9
1.4 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	11
2.1 Σχέσεις τάσης- παραμόρφωσης.....	11
2.1.1 Ιξωδοελαστικό μοντέλο.....	11
2.1.2 Μοντέλο Masing .....	13
2.2 Δείκτης πλαστικότητας .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	19
3.1 Έρευνα των Mladen Vucetic και Ricardo Dobry .....	19
3.2 Συμπεράσματα από την έρευνα των Mladen Vucetic-Ricardo Dobry.....	23
3.3 Σεισμός του Μεξικού .....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	27
4.1 Calibration.....	27
4.2 Μοντέλο SIG3 .....	27
4.3 Εφαρμογές του μοντέλου sig3.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	32
5.1 Αποτύπωση των πειραματικών καμπυλών.....	32
5.2 Εφαρμογή του κώδικα-Παρουσίαση των αποτελεσμάτων.....	41
5.2.1 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας $PI=0$ .....	42
5.2.2 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας $PI=15$ .....	45
5.2.3 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας $PI=30$ .....	48
5.2.4 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας $PI=50$ .....	51
5.2.5. Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας $PI=100$ .....	54

5.2.6 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας $PI=200$ .....	57
5.3 Αναλυτικότερες παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων .....	60
5.3.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων .....	60
5.3.2 Σχολιασμός των παραμέτρων του μοντέλου .....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	63
6.1 Εφαρμογή των αποτελεσμάτων σε δοκιμή άμεσης διάτμησης.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 .....	72
7.1 Συμπεράσματα.....	72
7.2 Προτάσεις.....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	75
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	75
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	76
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	77

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 Εισαγωγή

Η εδαφοδυναμική αποτελεί έναν κλάδο, ουσιαστικά μία επέκταση της εδαφομηχανικής στις δυναμικές φορτίσεις. Κύρια αντικείμενα μελέτης της, είναι η εκτίμηση των παραμέτρων σχεδιασμού των κατασκευών, αφού έχει ερευνηθεί η σεισμική απόκριση των εδαφών και η δυναμική συμπεριφορά των εδαφικών σχεδιασμών, καθώς και η διατμητική αντοχή τους υπό το καθεστώς δυναμικών φορτίσεων [Πιτιλάκης Κ. Δ.].

Ως δυναμική χαρακτηρίζεται η φόρτιση η οποία πραγματοποιείται με μεγάλη ταχύτητα, έχει σχετικά μικρή διάρκεια και η μορφή της έχει συνήθως επαναληπτικό χαρακτήρα. Επίσης, βασικό χαρακτηριστικό που δεν μπορεί να αγνοηθεί είναι η αδρανειακή δύναμη που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια των δυναμικών φορτίσεων. Συγκεκριμένα, η αδρανειακή δύναμη μπορεί πολύ γρήγορα να γίνει τόσο ισχυρή ώστε να προκαλέσει προβλήματα ακόμα και όταν το επίπεδο της παραμόρφωσης είναι μικρό. Επομένως, είναι απαραίτητη η μελέτη της συμπεριφοράς των εδαφών σε πολύ μικρές παραμορφώσεις, της τάξης του  $10^{-6}$  [Ishihara K.].

Οι βασικές διαφορές μεταξύ στατικού και δυναμικού προβλήματος είναι:

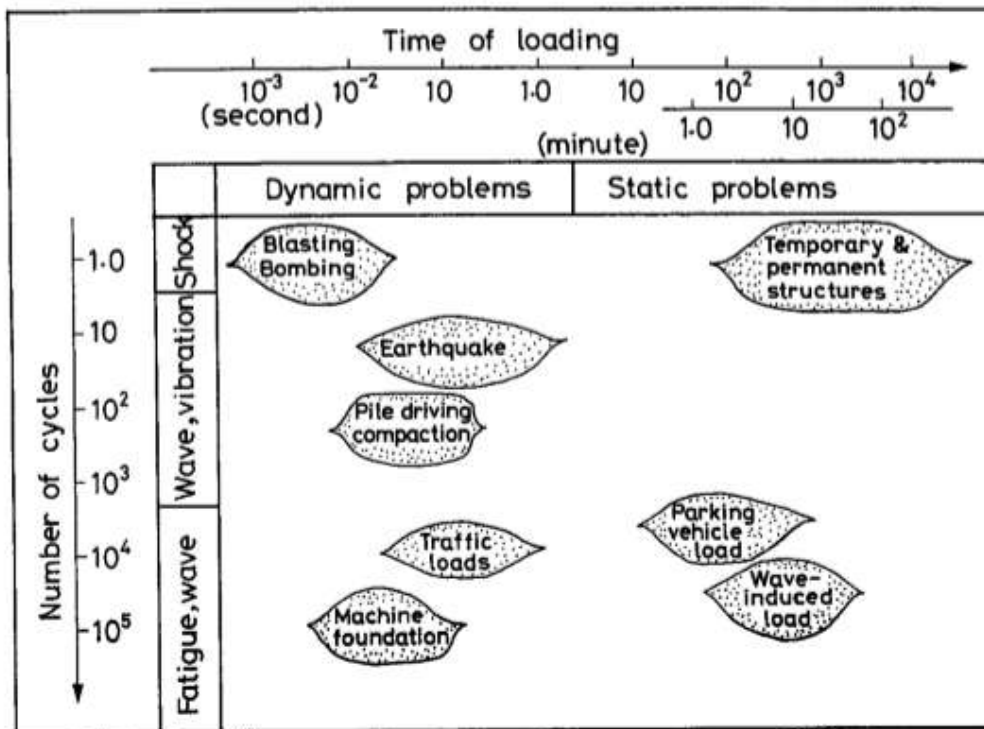
- η ταχύτητα της φόρτισης
- το εύρος της παραμόρφωσης
- η διάρκεια της φόρτισης
- η συχνότητα της φόρτισης

Σε ένα δυναμικό πρόβλημα η φόρτιση διαρκεί από μερικά δευτερόλεπτα έως ένα ή δύο λεπτά και η συχνότητα από 0.1 έως 20 Hz. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στις δυναμικές φορτίσεις είναι σημαντικές οι πολύ μικρές παραμορφώσεις, γεγονός που δεν ισχύει για τα στατικά προβλήματα της εδαφομηχανικής. Αυτό αποτελεί ίσως την πιο αξιοπρόσεκτη διαφορά μεταξύ δυναμικού και στατικού προβλήματος. Τα χαρακτηριστικά και η ταξινόμηση των δυναμικών προβλημάτων φαίνονται καλύτερα στο σχήμα 1.1.

Η ανάπτυξη της εδαφοδυναμικής έγινε εντονότερη τις τελευταίες δεκαετίες, όταν ξεκίνησαν οι κατασκευές πυρηνικών σταθμών και η άντληση πετρελαίου με την κατασκευή εξεδρών. Ο υψηλός συντελεστής ασφαλείας που ήταν απαραίτητος για αυτά τα εγχειρήματα, καθώς και οι δύσκολες συνθήκες κάτω από τις οποίες έπρεπε να πραγματοποιηθεί η ανοικοδόμησή τους, κατέστησε αναγκαία τη βαθύτερη γνώση για τη συμπεριφορά του εδάφους κάτω υπό έντονες, σεισμικές ή επαναληπτικού τύπου φορτίσεις. Επιπλέον, οι σεισμοί που καταγράφηκαν τα τελευταία χρόνια και προκάλεσαν προβλήματα μεγάλου βαθμού, αποτέλεσαν άλλον έναν λόγο της έντονης ανάπτυξης της εδαφοδυναμικής [Πιτιλάκης Κ. Δ.].

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθούν οι τρεις σπουδαιότερες πηγές δυναμικής φόρτισης, οι οποίες είναι [Γκαζέτας Γ.]:

- οι σεισμοί
- οι περιστρεφόμενες μηχανές
- τα θαλάσσια κύματα



Σχήμα 1.1 Περιγραφή και ταξινόμηση των δυναμικών προβλημάτων [Ishihara K.]



## 1.2 Ορισμός του προβλήματος

Ένα από τα αντικείμενα μελέτης της εδαφοδυναμικής αποτελούν τα δύο βασικά δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφών, τα οποία είναι το μέτρο διάτμησης  $G$  και ο λόγος απόσβεσης  $\xi$  ή  $\lambda$ . Οι δύο αυτοί παράμετροι, οι οποίοι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση των εδαφών κάτω από δυναμικές φορτίσεις, έχουν μελετηθεί και αναλυθεί στο παρελθόν από πολλούς επιστήμονες και ερευνητές. Ένα από τα βασικά ερωτήματα που έχει απασχολήσει τους ανθρώπους που ασχολούνται με το αντικείμενο της εδαφοδυναμικής είναι το πώς επηρεάζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών όταν αλλάζει ο δείκτης πλαστικότητάς τους. Το 1991 δημοσιεύτηκε μία έρευνα πάνω σε αυτό το κομμάτι από τους Mladen Vucetic και Ricardo Dobry. Η έρευνα περιελάμβανε καμπύλες που αντιπροσώπευαν τη συμπεριφορά των δυναμικών χαρακτηριστικών καθώς άλλαζε ο δείκτης πλαστικότητάς τους. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας λαμβάνονται υπόψη μέχρι και σήμερα. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από προγράμματα που προσομοιώνουν τη δυναμική συμπεριφορά των εδαφών.

## 1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Τα αποτελέσματα της έρευνας που δημοσιεύτηκε το 1991 και αφορούσαν τη συμπεριφορά του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης συνεκτικών εδαφών με διαφορετικό δείκτη πλαστικότητας αποτέλεσαν το έναυσμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στόχος της εργασίας ήταν μέσω ενός μοντέλου του προγράμματος FLAC, το οποίο εφαρμόζεται σε δυναμικά προβλήματα και ονομάζεται sig3, να αναπτυχθούν οι υπάρχουσες πειραματικές καμπύλες, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Ιδανικό αποτέλεσμα θα ήταν η ταύτιση των καμπυλών που θα προκύψουν από το μοντέλο με τις αρχικές από την έρευνα του 1991. Το μοντέλο sig3 λειτουργεί με παραμέτρους, οι οποίες θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ή να βρεθούν εύκολα μέσα από τη διαδικασία της γραμμικής παρεμβολής, μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

#### 1.4 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι βασικές σχέσεις και εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία. Οι σχέσεις αυτές αφορούν τις διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις, καθώς και τη συσχέτιση μεταξύ τους. Επίσης, αναλύονται δύο είδη μοντέλων, το ιξωδοελαστικό και το μοντέλο Masing, τα οποία ουσιαστικά περιγράφουν τη σχέση της τάσης και της παραμόρφωσης στις μικρές και στις μεγάλες παραμόρφώσεις αντίστοιχα. Επίσης, γίνεται αναφορά στο δείκτη πλαστικότητας και τη σπουδαιότητά του.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά σε μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Mladen Vucetic και Ricardo Dobry πάνω σε εδαφικά δοκίμια διαφορετικής πλαστικότητας. Πάνω σε αυτή την έρευνα στηρίχτηκε και η διπλωματική εργασία.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται το μοντέλο sig3, το οποίο χρησιμοποιείται στην εργασία και εξηγείται ο λόγος που επιλέχτηκε.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα Mathematica και πραγματοποιείται λεπτομερής σχολιασμός τους.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται αξιοποίηση των αποτελεσμάτων που βρίσκονται στο κεφάλαιο πέντε. Ουσιαστικά χρησιμοποιούνται οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων που βρέθηκαν, σε μία δοκιμή άμεσης διάτμησης. Κατά αυτόν τον τρόπο καθίσταται πιο κατανοητή η χρησιμότητά τους σε δυναμικά προβλήματα.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 γίνεται μία σύνοψη των αποτελεσμάτων και καταγράφονται τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν. Επιπλέον, γίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Σχέσεις τάσης- παραμόρφωσης

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μελέτη για την απόκριση των εδαφών και των εδαφικών κατασκευών κάτω από δυναμικές φορτίσεις, καθίσταται σημαντικός παράγοντας η συσχέτιση της διατμητικής τάσης  $\tau$  (shear stress) με τη διατμητική παραμόρφωση  $\gamma$  (shear strain). Από τη συσχέτιση αυτή προκύπτουν τα βασικά δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφών, δηλαδή το μέτρο διάτμησης και ο λόγος απόσβεσης. Τα μεγέθη αυτά καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη δυναμική απόκριση των κατασκευών.

Για πολύ μικρές παραμορφώσεις η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και παραμόρφωσης είναι γραμμική, ενώ καθώς μεγαλώνουν οι παραμορφώσεις καθίσταται μη γραμμική.

#### 2.1.1 Ιξωδοελαστικό μοντέλο

Στις πολύ μικρές παραμορφώσεις η σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης περιγράφεται ικανοποιητικά μέσα από το ιξωδοελαστικό μοντέλο. Σύμφωνα με αυτό η σχέση μεταξύ των δύο εξεταζόμενων μεγεθών είναι γραμμική, ενώ λαμβάνεται υπόψη η απώλεια ενέργειας κατά τη φόρτιση [Πιτιλάκης Κ. Δ., Ishihara K.].

Στην περίπτωση της απλής αρμονικής φόρτισης η εξίσωση της τάσης είναι η εξής:

$$\tau = \tau_{\alpha} \sin \omega t \quad (2.1)$$

Αντίστοιχα, ακολουθεί η εξίσωση της διατμητικής παραμόρφωσης.

$$\gamma = \gamma_{\alpha} \sin(\omega t - \delta) \quad (2.2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις τα  $\tau_{\alpha}$  και  $\gamma_{\alpha}$  είναι τα αντίστοιχα πλάτη και  $\delta$  είναι η διαφορά φάσης που υποδηλώνει τη χρονική υστέρηση εμφάνισης της παραμόρφωσης μετά από την επιβολή της τάσης. Επιπλέον από τις εξισώσεις φαίνεται ότι το μέτρο διάτμησης, το οποίο προκύπτει από τη διαίρεση των δύο μεγεθών, δηλαδή  $\frac{\tau}{\gamma}$ , εξαρτάται από το λόγο των πλατών, αλλά και από τη διαφορά φάσης.

Οι σχέσεις 2.1 και 2.2 μπορούν να εκφραστούν κατάλληλα και από τις εξής εξισώσεις:

$$\tau_R = \tau_\alpha \cos \omega t \quad (2.3)$$

$$\gamma_R = \gamma_\alpha \cos(\omega t - \delta) \quad (2.4)$$

Εναλλακτικά χρησιμοποιούνται οι μιγαδικές σχέσεις:

$$\bar{\tau} = \tau_\alpha e^{i\omega t} \quad (2.5)$$

$$\bar{\gamma} = \gamma_\alpha e^{i(\omega t - \delta)} \quad (2.6)$$

$$\text{όπου } \bar{\tau} = \tau_R + i\tau \quad (2.7)$$

$$\bar{\gamma} = \gamma_R + i\gamma \quad (2.8)$$

Επομένως, το μέτρο διάτμησης σε αυτή την περίπτωση δίνεται από την εξής σχέση:

$$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\gamma}} = \frac{\tau_\alpha}{\gamma_\alpha} e^{i\delta} = \left(\frac{\tau_\alpha}{\gamma_\alpha}\right) (\cos \delta + i \sin \delta) \quad (2.9)$$

Αντικαθιστώντας το  $\left(\frac{\tau_\alpha}{\gamma_\alpha}\right) \cos \delta$  με μία μεταβλητή  $\mu$  η οποία εκφράζει το ελαστικό μέτρο διάτμησης και το  $\left(\frac{\tau_\alpha}{\gamma_\alpha}\right) i \sin \delta$  με μία μεταβλητή  $\mu'$  η οποία εκφράζει την απώλεια ενέργειας ή την απόσβεση του υλικού προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\gamma}} = \mu + i\mu' = \mu^* \quad (2.10)$$

Το  $\mu^*$  εκφράζει το μιγαδικό μέτρο διάτμησης.

Τέλος, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί ως

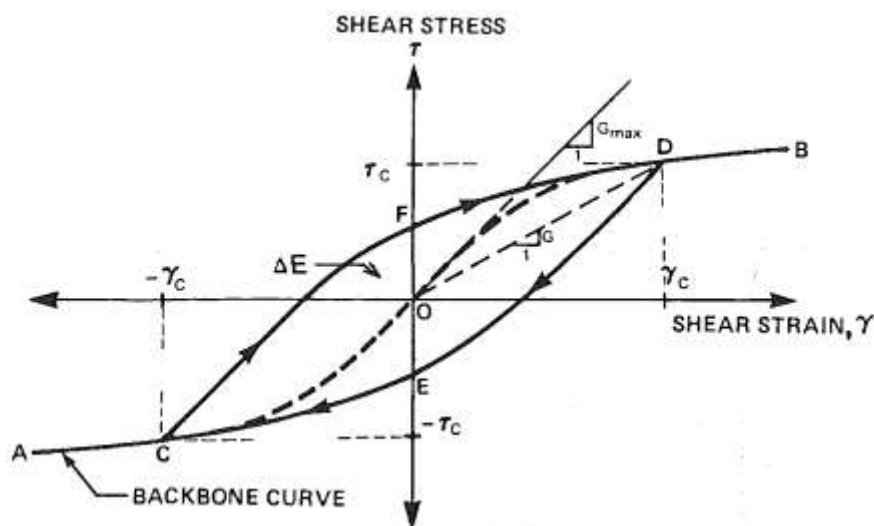
$$\tan \delta = \frac{\mu'}{\mu} = \eta \quad (2.11)$$

Το  $\eta$  εκφράζει την απώλεια ενέργειας ή την απόσβεση κατά την ταλάντωση, ονομάζεται συντελεστής απόσβεσης και μπορεί να θεωρηθεί ότι εκφράζει για κάθε κύκλο φόρτισης τον λόγο των διατμητικών τάσεων σε μηδενική και μέγιστη παραμόρφωση.

$$\eta = \frac{\text{διατμητική τάση σε μηδενική διατμητική παραμόρφωση}}{\text{διατμητική τάση στη μέγιστη διατμητική παραμόρφωση}}$$

### 2.1.2 Μοντέλο Masing

Στις μεγάλες παραμορφώσεις η σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης καθίσταται μη γραμμική και επομένως δεν μπορεί να περιγραφεί σωστά από το ιξωδοελαστικό μοντέλο που παρουσιάστηκε νωρίτερα. Η βασική μη γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και παραμόρφωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Σχέση τάσης-παραμόρφωσης στον πρώτο κύκλο φόρτισης

Αναλυτικότερα, το προσομοίωμα που εμφανίζεται στο σχήμα αποτελείται από μία σκελετική μη γραμμική καμπύλη (backbone or skeleton curve), αντισυμμετρική ως προς τους άξονες  $\tau$  και  $\gamma$  και μία καμπύλη φόρτισης και μία αποφόρτισης, οι οποίες δημιουργούν και τον βρόχο υστέρησης. Ο βρόχος αυτός προδίδει ουσιαστικά τον μη γραμμικό χαρακτήρα των εδαφών [Πιτιλάκης Κ. Δ., Ishihara Κ.].

Οι εξισώσεις που αντιστοιχούν σε κάθε καμπύλη είναι:

$$\tau = f(\gamma) \quad (2.12)$$

που αντιστοιχεί στη σκελετική καμπύλη

$$\frac{\tau - \tau_c}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_c}{2}\right) \quad (2.13)$$

που αντιστοιχεί στην καμπύλη αποφόρτισης

$$\frac{\tau + \tau_c}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_c}{2}\right) \quad (2.14)$$

που αντιστοιχεί στην καμπύλη φόρτισης

Όπως προαναφέρθηκε από τη γενική αυτή σχέση μεταξύ της διατμητικής παραμόρφωσης και της διατμητικής τάσης μπορούν να προσδιοριστούν αναλυτικά το αρχικό ή εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης  $G_o$  ή  $G_{max}$ , το διατέμνον μέτρο διάτμησης  $G$  (secant shear modulus) και ο λόγος απόσβεσης  $\lambda$  ή  $\xi$  (damping ratio).

Το εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης αναφέρεται σε πολύ μικρές παραμορφώσεις και μπορεί να εκφραστεί και μέσα από την διατμητική ταχύτητα των κυμάτων, η οποία ορίζεται ως:

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{max}}{\rho}}$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού

Το διατέμνων μέτρο διάτμησης δίνεται από τη σχέση:

$$G = \frac{\tau_c}{\gamma_c} = \frac{f(\gamma_c)}{\gamma_c} \quad (2.15)$$

Ο λόγος απόσβεσης σε κάθε κύκλο φόρτισης δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2.16)$$

όπου  $\Delta W$  η ενέργεια που καταναλώνεται σε ολόκληρο τον κύκλο φόρτισης

$W$  η μέγιστη αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια

Η ενέργεια που καταναλώνεται σε ολόκληρο τον κύκλο δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta W = 8 \left[ \int_0^{\gamma_c} f(\gamma) d\gamma - W \right] \quad (2.17)$$

Η μέγιστη αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια δίνεται από τη σχέση:

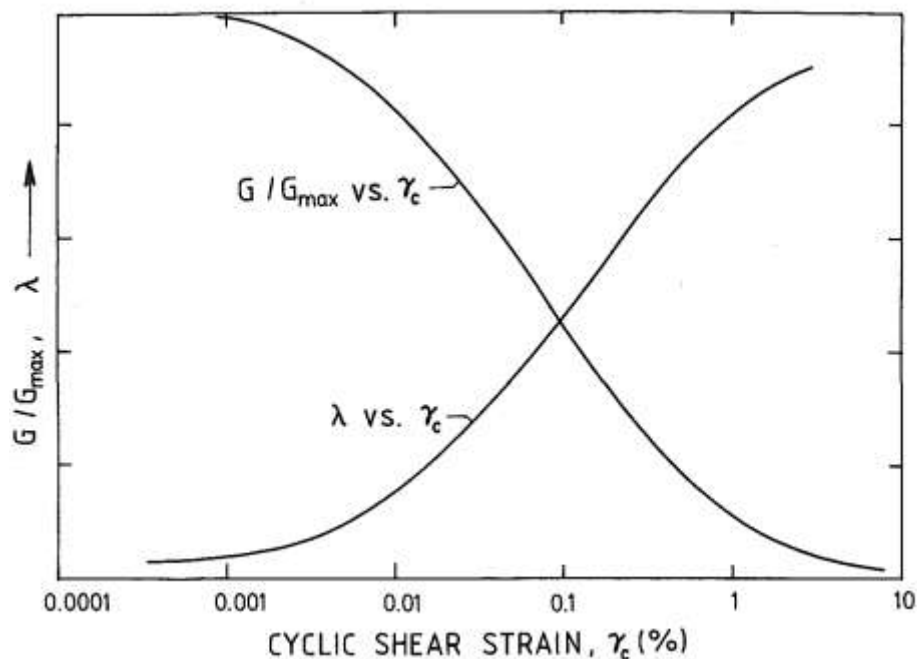
$$W = \frac{1}{2} \gamma_c f(\gamma_c) \quad (2.18)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις των ενεργειών στην εξίσωση του λόγου απόσβεσης η σχέση μετατρέπεται ως εξής:

$$\lambda = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{2 \int_0^{\gamma_c} f(\gamma) d\gamma}{\gamma_c f(\gamma_c)} - 1 \right] \quad (2.19)$$

Οι σχέσεις του παραπάνω μοντέλου, το οποίο προτάθηκε από τον Masing το 1926 και φέρει το όνομά του, χρησιμοποιούνται για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας [Masing G.].

Το τέμνον μέτρο διάτμησης και ο λόγος απόσβεσης αποτελούν τις δύο κύριες παραμέτρους που καθορίζουν τη μη γραμμική συμπεριφορά των εδαφών. Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί ότι και τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται από τη διατμητική παραμόρφωση  $\gamma$ . Αυτός είναι και ο λόγος που η αναπαράστασή τους γίνεται σε συνάρτηση με την παραμόρφωση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Καμπύλες του  $G/G_{max}$  και της απόσβεσης με την διατμητική παραμόρφωση

Σύμφωνα με το σχήμα το μέτρο διάτμησης εμφανίζεται διαιρεμένο με το εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις, δηλαδή  $G/G_{max}$  και σε συνάρτηση με τη διατμητική παραμόρφωση. Αντίστοιχα, ο λόγος απόσβεσης παρουσιάζεται σε συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης. Αυτές οι συσχετίσεις είναι βολικές γιατί ο λόγος  $G/G_{max}$  και το  $\lambda$  είναι αδιάστατα μεγέθη τα οποία δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από παράγοντες όπως ο βαθμός προστερεοποίησης OCR [Dobry R. and Vucetic M.]. Ένας ακόμα λόγος είναι ότι το εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις μπορεί να εκτιμηθεί από επί τόπου μετρήσεις της διατμητικής ταχύτητας. Έτσι, συνδυάζοντας την καμπύλη του  $G/G_{max}$  με την παραμόρφωση, μπορούν να βρεθούν οι τιμές του τέμνον μέτρου διάτμησης και της διατμητικής τάσης [Stokoe K. H.].



## 2.2 Δείκτης πλαστικότητας

Το μέτρο διάτμησης και ο λόγος απόσβεσης των εδαφών επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως ο λόγος κενών ( $e$ ), η γεωλογική ηλικία των εδαφών και ο αριθμός των κυκλικών φορτίσεων. Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες είναι ο δείκτης πλαστικότητας ( $PI$ ). Ο δείκτης πλαστικότητας απορρέει από τα όρια Atterberg τα οποία αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά κάθε εδάφους και υπολογίζονται πάντα για τις γεωλογικές μελέτες. Η εύρεσή τους πραγματοποιείται εύκολα μέσα από εργαστηριακά πειράματα. Η εξίσωση σύμφωνα με την οποία βρίσκεται ο δείκτης πλαστικότητας είναι [Παπαχαρίσης Ν., Γραμματικόπουλος Ι. και Μάνου-Ανδρεάδη Ν. (1999), (Κεφάλαιο 5, 5.5.5 Δείκτες ορίων Atterberg)]:

$$PI = W_L - W_P \quad (2.20)$$

όπου  $W_L$  το όριο υδαρότητας και  $W_P$  το όριο πλαστικότητας

Η κατάσταση των εδαφών με βάση τον δείκτη πλαστικότητας εμφανίζεται στον πίνακα 2.1.

<b>Βαθμός πλαστικότητας</b>	<b><math>PI</math></b>
άνευ	0
ελαφράς	1÷5
μικρής	5÷10
μέσης	10÷20
μεγάλης	20÷40
πολύ μεγάλης	>40

Πίνακας 2.1 Περιγραφή της κατάστασης των εδαφών σύμφωνα με το δείκτη πλαστικότητας [Παπαχαρίσης Ν., Γραμματικόπουλος Ι. και Μάνου-Ανδρεάδη Ν.(1999)]

Έχει αποδειχτεί ότι ο δείκτης πλαστικότητας επηρεάζει κάποιους από τους παράγοντες που με τη σειρά τους επιδρούν στα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφών. Οι Anderson και Stokoe το 1978 και ο Kokusho και οι συνεργάτες του το 1982 κατέληξαν στο ότι το εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης αυξάνεται περισσότερο όσο αυξάνεται η γεωλογική ηλικία των εδαφών που χαρακτηρίζονται από υψηλό δείκτη πλαστικότητας [Anderson D. G. and Stokoe K. H. (1978) , Kokusho T., Yoshida Y. and Esashi Y. (1982)].

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τον τρόπο με τον οποίο ο δείκτης πλαστικότητας επηρεάζει τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφών. Ενδεικτικά αναφέρεται παρακάτω μία εμπειρική πειραματική σχέση που προτάθηκε μετά από μελέτες που πραγματοποίησαν οι Hardin και Black το 1968 και ο Hardin το 1978 [Hardin B. O. and Black W. L. (1968), Hardin B. O. (1978)].

$$G_o = 625 \frac{OCR^k}{0.3 + 0.7e^2} \sqrt{P_a \bar{\sigma}_o}$$

όπου  $P_a$  η ατμοσφαιρική πίεση

$$\bar{\sigma}_o \text{ η μέση κύρια τάση, } \bar{\sigma}_o = \frac{\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3}{3}$$

$OCR$  ο βαθμός προστερεοποίησης του εδάφους

$e$  ο λόγος κενών του εδάφους

$k$  ο δείκτης πλαστικότητας του εδάφους, ο οποίος δίνεται από τον πίνακα 2.2

<b>PI</b>	0	20	40	60	80	>100
<b>k</b>	0	0.18	0.30	0.41	0.48	0.50

Πίνακας 2.2 Αντιστοίχιση του δείκτη πλαστικότητας με το k



Προφανώς, το μέτρο διάτμησης για τα μη συνεκτικά εδάφη δεν εξαρτάται από το δείκτη πλαστικότητας ( $PI=0$ ). Αντίθετα, όσον αφορά τα συνεκτικά εδάφη το μέτρο διάτμησης αυξάνεται όσο αυξάνεται ο δείκτης πλαστικότητας.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι και άλλοι ερευνητές μελέτησαν τη σχέση του δείκτη πλαστικότητας με το μέτρο διάτμησης και το λόγο απόσβεσης των εδαφών. Πιο συγκεκριμένα το 1982 ο Kokusho και οι συνεργάτες του δημοσίευσαν μία έρευνα σύμφωνα με την οποία όταν η πλαστικότητα αυξάνεται, μεγαλώνει και η τιμή του λόγου  $G/G_{max}$  συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης. Αντίθετα, στην ίδια περίπτωση ο λόγος απόσβεσης μειώνεται [Kokusho et. al (1982)]. Το 1986 ο Ishihara αξιοποιώντας την έρευνα του 1982 παρουσίασε αποτελέσματα που έδειχναν τη συσχέτιση του δείκτη πλαστικότητας με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφών [Ishihara K.(1986)]. Αυτή η συσχέτιση είχε δημοσιευτεί και σε έρευνες που πραγματοποιήθηκαν νωρίτερα πάνω σε αργίλους με διαφορετική πλαστικότητα. Οι δημοσιεύσεις αυτές συντάχθηκαν από τους Anderson και Richard το 1976 και από τους Kim και Novak το 1981 [Anderson D. G. and Richard F. E. (1976), Kim T. C. and Novak M. (1981)].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 Έρευνα των Mladen Vucetic και Ricardo Dobry

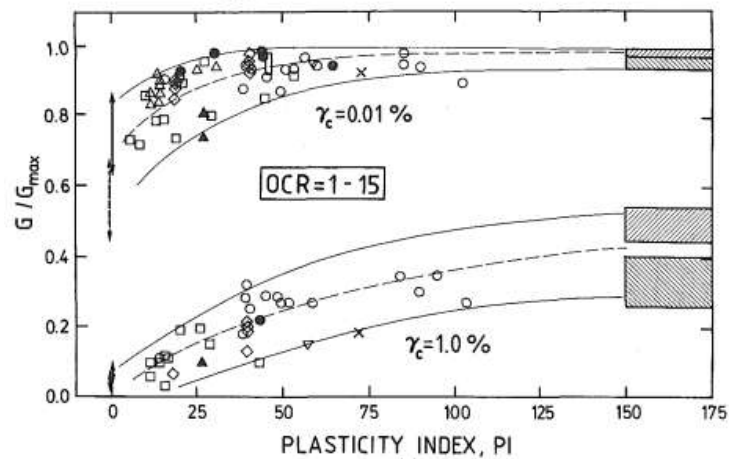
Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας στηρίχθηκε στα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν το 1991 σε μία έρευνα που διεξάχθηκε από τον Mladen Vucetic και τον Ricardo Dobry και αναφέρονται στον τρόπο που επηρεάζει ο δείκτης πλαστικότητας (PI) τα δυναμικά χαρακτηριστικά των συνεκτικών εδαφών [Vucetic M. and Dobry R. (1991)]. Για την διεξαγωγή της έρευνά τους αξιοποίησαν τα δεδομένα που εμφανίζονται στον πίνακα 3.1.

Symbols Used in Figs. 4 & 5	Type of Cyclic Test	Overcon- solidation Ratio OCR	Number of Cycles N	Reference
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
▽	-	-	-	Nishigaki (1970)
↑ ↓	Different	-	-	Seed & Idriss (1970)
	-	-	-	Leon et al. (1974) Romo and Jaime (1986)
●	Resonant Column	-	1000	Anderson and Richart (1976)
×	-	-	-	Zen et al. (1978)
◇	Resonant Column, Triaxial	1,2,4,8	- 10	Koutsoftas & Fischer (1980)
△	Resonant Column	1,2,3,7	1000	Kim & Novak (1981)
□	Resonant Column	-	-	Andreasson (1981)
■	-	-	-	Lodde & Stokoe (1982)
○	Triaxial	1,5,10,15	10	Kokusho et al. (1982)
▲	Simple Shear	1,4	1	Andersen (1983)
□	Resonant Column, Triaxial, Simple Shear	-	-	Anderson et al. (1983)
↑ ↓	Triaxial	-	5	Seed et al. (1986)
◆	Simple Shear	1,2,4	1-64	Vucetic & Dobry (1986)
	Resonant Column, Triaxial	-	-	Romo et al. (1988)
◊	Simple Shear	1,2,4	1-20	Vucetic & Tan (1989)

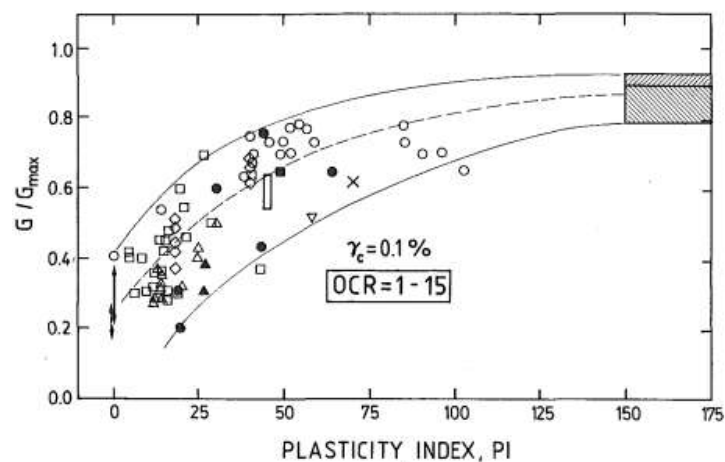
Πίνακας 3.1 Περιγραφή των μελετών στις οποίες βασίστηκε η έρευνα

Τα δεδομένα του πίνακα 3.1 προέρχονται από διαφορετικά εργαστήρια, τα οποία πραγματοποίησαν διάφορους τύπους κυκλικών δοκιμών σε κορεσμένα και συνεκτικά δοκίμια. Στις περισσότερες έρευνες το τέμνον μέτρο διάτμησης  $G_0$  και το εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης σε μικρές παραμορφώσεις  $G_{max}$  προέκυψαν από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια και διαιρέθηκαν για να δημιουργηθεί ο λόγος  $G/G_{max}$ . Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του πίνακα τα εδαφικά δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν 16, αλλά δεν εμφανίζονται οι απαραίτητες πληροφορίες σε όλα.

Προκειμένου να εντοπιστεί πώς επηρεάζει ο δείκτης πλαστικότητας τη σχέση της διατμητικής παραμόρφωσης με το λόγο  $G/G_{max}$ , επιλέχθηκαν από τον πίνακα 3.1 τιμές του λόγου  $G/G_{max}$  σε τρεις διαφορετικές διατμητικές παραμορφώσεις που ήταν οι 0.01%, 0.1% και 1%. Οι τιμές αυτές σχεδιάστηκαν σε συνάρτηση με το λόγο πλαστικότητάς τους και έτσι δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα 3.1 και 3.2.

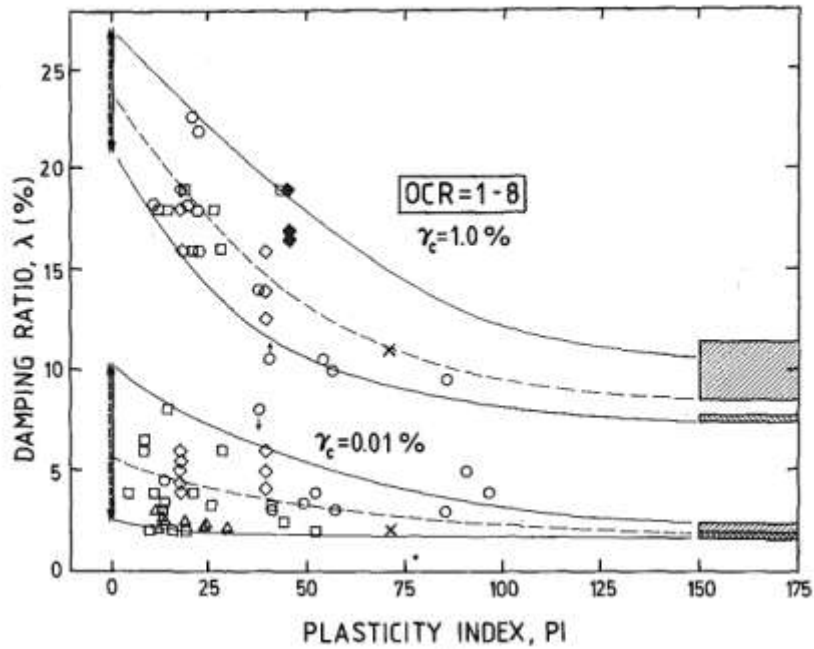


Διάγραμμα 3.1 Οι καμπύλες μεταξύ του  $G/G_{max}$  και του δείκτη πλαστικότητας [Dobry R. and Vucetic M.(1991)]

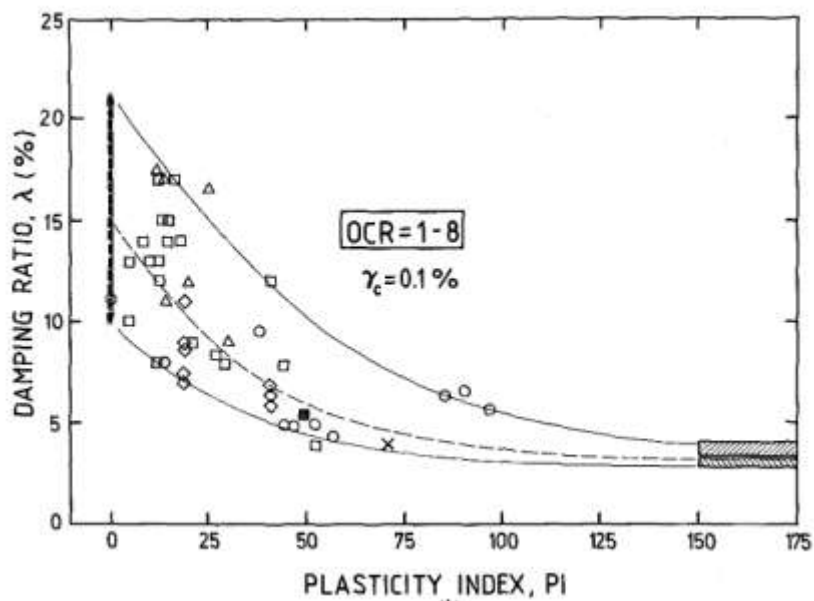


Διάγραμμα 3.2 Οι καμπύλες μεταξύ του  $G/G_{max}$  και του δείκτη πλαστικότητας [Dobry R. and Vucetic M.(1991)]

Αντίστοιχα, προέκυψαν και τα διαγράμματα 3.3 και 3.4 που παρουσιάζουν τη σχέση του λόγου απόσβεσης με το δείκτη πλαστικότητας στις τρεις προαναφερθείσες τιμές διατμητικής παραμόρφωσης.

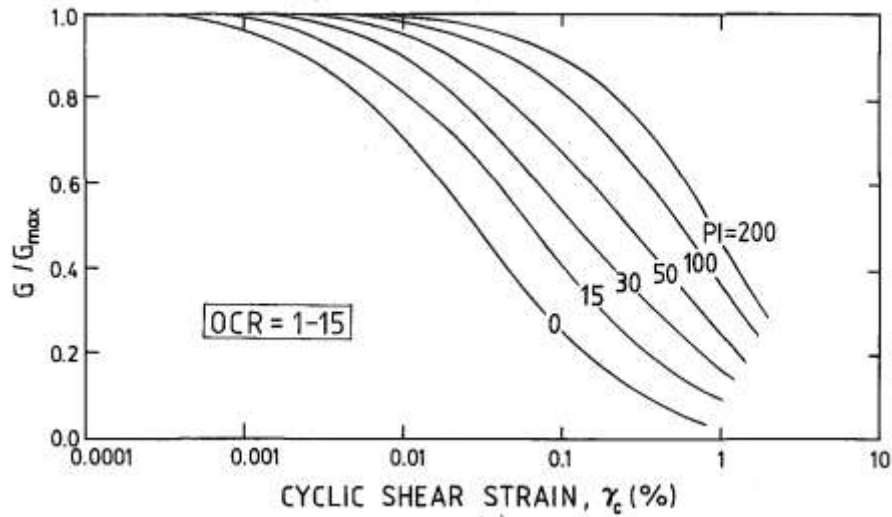


Διάγραμμα 3.3 Οι καμπύλες μεταξύ του λόγου απόσβεσης και του δείκτη πλαστικότητας [Dobry R. and Vucetic M.(1991)]

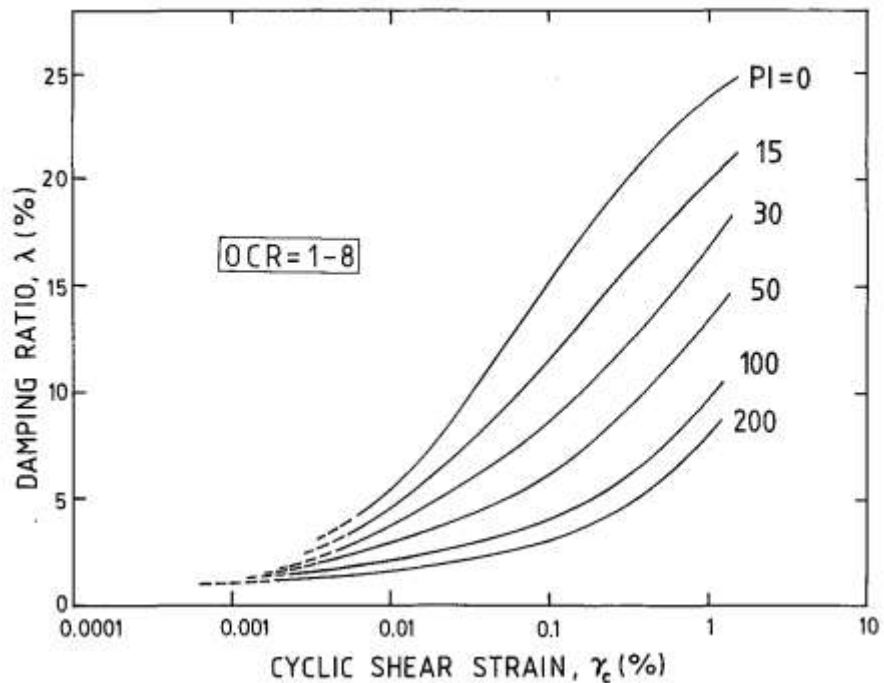


Διάγραμμα 3.4 Οι καμπύλες μεταξύ του λόγου απόσβεσης και του δείκτη πλαστικότητας [Dobry R. and Vucetic M.(1991)]

Έχοντας ως βάση τα διαγράμματα που εμφανίζονται παραπάνω καθώς και άλλες έρευνες οι Mladen Vucetic και Ricardo Dobry κατέληξαν στα διαγράμματα 3.5 και 3.6.



Διάγραμμα 3.5 Οι καμπύλες της σχέσης του  $G/G_{max}$  με την παραμόρφωση σε σχέση με τον δείκτη πλαστικότητας [Dobry R. and Vucetic M.(1991)]



Διάγραμμα 3.6 Οι καμπύλες της σχέσης απόσβεσης-παραμόρφωσης με βάση τον δείκτη πλαστικότητας [Dobry R. and Vucetic M.(1991)]

### 3.2 Συμπεράσματα από την έρευνα των Mladen Vucetic-Ricardo Dobry

Από τα διαγράμματα 3.5 και 3.6 γίνεται φανερό ότι όσο αυξάνεται ο δείκτης πλαστικότητας, αυξάνεται ο λόγος  $G/G_{max}$  του μέτρου διάτμησης, ενώ αντίθετα ο λόγος απόσβεσης μειώνεται. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι ο λόγος  $G/G_{max}$  μειώνεται όσο αυξάνεται η διατμητική παραμόρφωση, σε αντίθεση με το λόγο απόσβεσης ο οποίος αυξάνεται με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης. Επίσης, φαίνεται ότι για τα διαγράμματα που αφορούν το λόγο  $G/G_{max}$  εξετάστηκαν εδαφικά δοκίμια με βάθμο προστερεοποίησης 1-15, ενώ για τα διαγράμματα του λόγου απόσβεσης, οι τιμές του βαθμού προστερεοποίησης που τους αντιστοιχούν είναι 1-8.

Η καμπύλη, η οποία χαρακτηρίζεται από μηδενικό δείκτη πλαστικότητας, αναφέρεται σε κορεσμένα μη συνεκτικά εδάφη, όπως τα χαλίκια και οι άμμοι. Εδώ είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η καμπύλη αυτή συμπίπτει πλήρως με τα αποτελέσματα της έρευνας των Seed και Idriss το 1970 και των Seed et al. το 1986, η οποία αφορούσε κορεσμένα και μη συνεκτικά εδάφη [Seed H. B. and Idriss I. M. (1970), Seed H. B., Wong R. T., Idriss I. M. and Tokimatsu K. (1986)]. Επίσης, η καμπύλη με το μηδενικό δείκτη πλαστικότητας εμφανίζει την πιο έντονη μη γραμμική συμπεριφορά και σε αυτήν αντιστοιχούν οι μεγαλύτερες τιμές του λόγου απόσβεσης.

Γενικότερα, όσο αυξάνεται η πλαστικότητα των εδαφών, γίνεται πιο έντονη η γραμμική συμπεριφορά τους. Τα εδάφη αυτά κατέχουν και τις μικρότερες τιμές υστερητικής απόσβεσης.

Ένα επιπλέον στοιχείο, το οποίο γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα 3.6 και πρέπει να τονιστεί, είναι οι διακεκομμένες γραμμές που εμφανίζονται σε όλες τις καμπύλες για τις πολύ μικρές παραμορφώσεις. Η σχέση μεταξύ του δείκτη πλαστικότητας και της υστερητικής απόσβεσης στις πολύ μικρές παραμορφώσεις δεν είναι πλήρως αποσαφηνισμένη και για αυτό το λόγο υπάρχουν οι διακεκομμένες γραμμές. Στον πίνακα 3.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται το εύρος του λόγου απόσβεσης για δύο τιμές διατμητικής παραμόρφωσης, έτσι όπως μετρήθηκαν μέσα από πολλές έρευνες στο πέρασμα του χρόνου.

Reference	Range of $\lambda$ at Small Strains (%)	
	at $\gamma_c=0.0001\%$	at $\gamma_c=0.001\%$
Seed and Idriss (1970)	$\approx 0.5$	1–3
Leon et al. (1974), Romeo and Jaime (1986)	—	1.5–2.5
Koutsoftas and Fischer (1980)	—	4–5.5
Kim and Novak (1981)	—	1–2
Kokusho et al. (1982)	—	2.5–5
Anderson et al. (1983)	1–4	1–4
Seed et al. (1986)	—	$\approx 1$ –2
Romo et al. (1988)	1	1.5

Πίνακας 3.2 Το εύρος της υστερητικής απόσβεσης  $\lambda$  όπως έχει μετρηθεί στις μικρές παραμορφώσεις



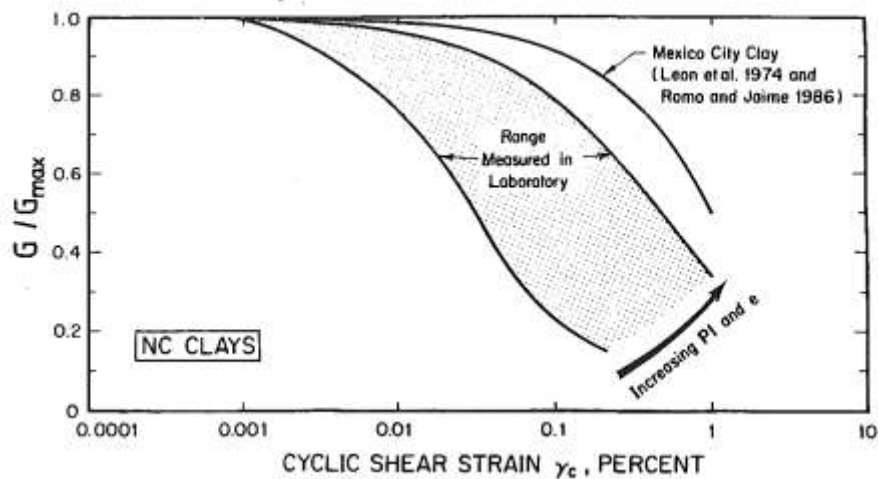
Από τις πληροφορίες του πίνακα 3.2 γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές του λόγου απόσβεσης κυμαίνονται από 0.5% μέχρι 5.5%, ανεξάρτητα του δείκτη πλαστικότητας. Συμπερασματικά, σε αυτές τις παραμορφώσεις θα πρέπει να γίνεται πιο λεπτομερής και προσεκτική έρευνα για τις τιμές της υστερητικής απόσβεσης.

Συνοψίζοντας, μέσα από την παραπάνω έρευνα προκύπτει ότι ο δείκτης πλαστικότητας είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των εδαφών. Εντούτοις, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του, καθώς και η συσχέτισή του με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφών, για κάθε γεωτεχνική μελέτη. Σε πολλές περιπτώσεις οι γνώσεις αυτές οδηγούν στην αποφυγή μεγάλων προβλημάτων που μπορεί να δημιουργηθούν από δυναμικές φορτίσεις, όπως ο σεισμός.

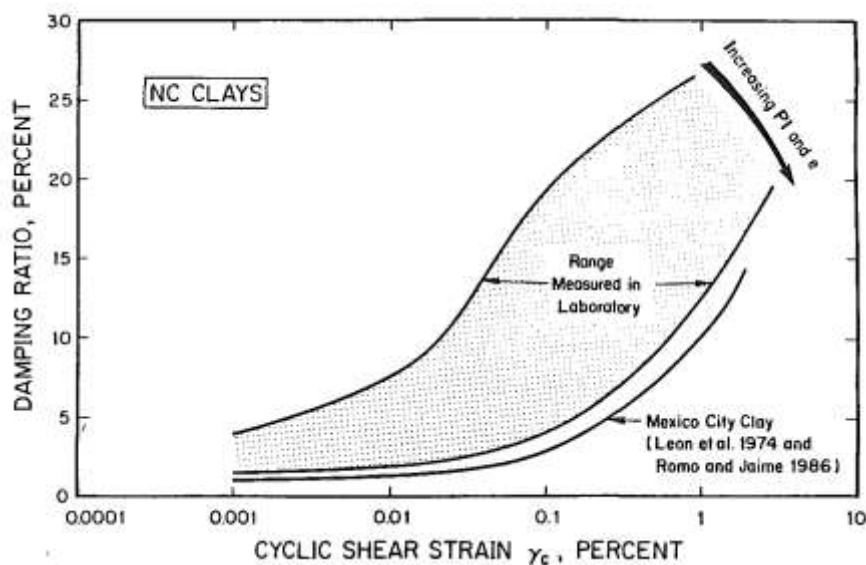


### 3.3 Σεισμός του Μεξικού

Χαρακτηριστικό παράδειγμα, που ο δείκτης πλαστικότητας αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για τα γεγονότα που διαδραματίστηκαν, είναι ο σεισμός που συνέβη το 1985 στο Μεξικό και προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές σε ένα κομμάτι της πόλης. Αυτό το κομμάτι της πόλης ήταν θεμελιωμένο σε άργιλο με πολύ μεγάλη πλαστικότητα, όπως φαίνεται στα διαγράμματα 3.7 και 3.8.



Διάγραμμα 3.7 Σχέση του λόγου  $G/G_{max}$  με την παραμόρφωση με βάση τον δείκτη πλαστικότητας (εμφανίζεται και η άργιλος του Μεξικού) [Dobry R. and Vucetic M.(1987)]



Διάγραμμα 3.8 Σχέση της απόσβεσης-παραμόρφωσης με βάση την πλαστικότητα(εμφανίζεται και η άργιλος του Μεξικού) [Dobry R. and Vucetic M.(1987)]

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 3.7 και 3.8 η άργιλος του Μεξικού εμφανίζει μεγαλύτερη πλαστικότητα από όλα τα εδάφη που έχουν εξεταστεί στο εργαστήριο. Αυτή η ιδιαιτερότητα είχε ως αποτέλεσμα η άργιλος να συμπεριφέρεται γραμμικά και ελαστικά για διατμητική παραμόρφωση μέχρι και 0.1 %. Σε αυτό το διάστημα η άργιλος κατείχε μεγάλο μέτρο διάτμησης ( ο λόγος  $G/G_{max}$  ήταν μεγαλύτερος από 0.90) και πολύ μικρό λόγο απόσβεσης ( το  $\lambda$  ήταν μικρότερο από 2%). Όλα αυτά συντέλεσαν στην εδαφική ενίσχυση του σεισμού ο οποίος καταγράφηκε το 1985 και προκάλεσε τεράστιες ζημιές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Calibration

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε σε μία διαδικασία που στα αγγλικά καλείται ‘calibration’ (βαθμονόμηση). Στην τεχνολογία η οποία ασχολείται με τις μετρήσεις βαθμονόμηση είναι η σύγκριση μεταξύ μετρήσεων που βρέθηκαν μέσω μίας συσκευής και αντίστοιχων που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν μέσα από κάποια άλλη διαδικασία [Wikipedia]. Φυσικά και στις δύο περιπτώσεις συγκρίνονται μετρήσεις που αφορούν παρόμοιες παράμετροι. Μέσα από τη σύγκριση μπορεί να προκύψει απόλυτη ακρίβεια μεταξύ των μετρήσεων ή να προκύψει σημαντική απόκλιση.

Στην περίπτωση της διπλωματικής εργασίας τα αποτελέσματα που χαρακτηρίστηκαν ως δεδομένα είναι τα διαγράμματα 3.5 και 3.6, τα οποία βρίσκονται στο κεφάλαιο 3. Οι καμπύλες που εμφανίζονται στα διαγράμματα αυτά αρχικά αποτυπώθηκαν σε ηλεκτρονική μορφή. Στη συνέχεια, προσομοιώθηκαν μέσω ενός υστερητικού μοντέλου κατάλληλου για την περιγραφή της ανακυκλικής συμπεριφοράς υλικού και πραγματοποιήθηκε η σύγκρισή τους. Το μοντέλο που αξιοποιήθηκε ανήκει στο πρόγραμμα FLAC και ονομάζεται sig3.

### 4.2 Μοντέλο SIG3

Το μοντέλο sig3 χρησιμοποιείται στη μη γραμμική δυναμική ανάλυση και συγκεκριμένα στην περίπτωση της υστερητικής απόσβεσης. Το sig3 αποτελεί ένα σιγμοειδές μοντέλο. Σιγμοειδείς είναι οι μαθηματικές συναρτήσεις που έχουν καμπύλες με μορφή S. Τέτοιες συναρτήσεις εφαρμόζονται σε περιπτώσεις παλινδρόμησης, καθώς εμφανίζουν ασυμπτωτική συμπεριφορά [Wikipedia]. Επομένως, το μοντέλο sig3 αποτελεί μία κατάλληλη συνάρτηση για τη διεκπεραίωση της εργασίας, εφόσον αυτή βασίζεται στη χρονική παλινδρόμηση.

Το μοντέλο sig3 ορίζεται από την παρακάτω συνάρτηση:

$$M_s = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{(L - x_0)}{b}\right)}$$

Ουσιαστικά, το  $M_s$  αντιπροσωπεύει το κανονικοποιημένο διατέμνον μέτρο διάτμησης το οποίο ισούται με  $\frac{\bar{\tau}}{\bar{\gamma}}$ .

Στην παραπάνω συνάρτηση το  $L$  ισούται με  $L = \log_{10}(\gamma)$ , όπου  $\gamma$  είναι η διατμητική παραμόρφωση που εφαρμόζεται κάθε φορά.

Οι παράμετροι  $\alpha, b$  και  $x_0$  είναι ουσιαστικά αυτές που καθορίζουν τη μορφή της συνάρτησης και αυτές που ουσιαστικά πρέπει να βρεθούν μετά το πέρας της διπλωματικής εργασίας.

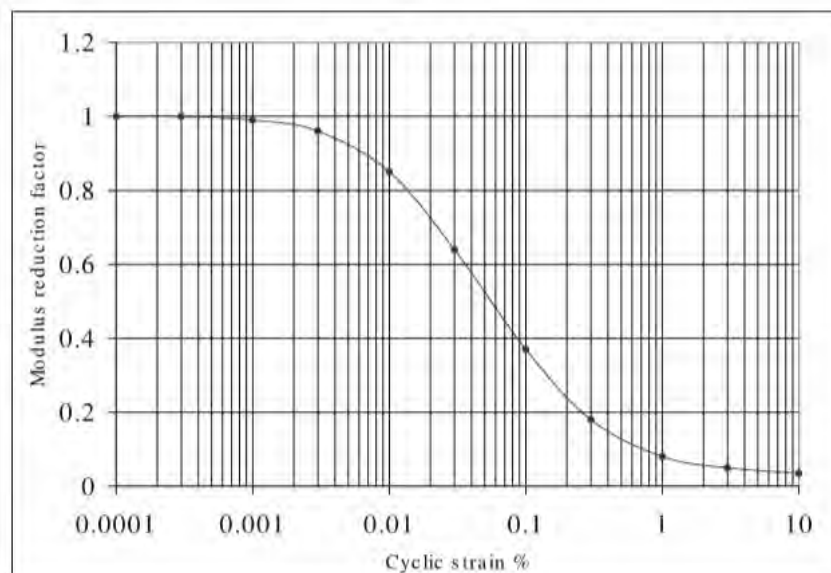
### 4.3 Εφαρμογές του μοντέλου sig3

Στο εγχειρίδιο του προγράμματος FLAC, δίνονται οι τιμές των παραμέτρων  $\alpha, b$  και  $x_0$  οι οποίες αποδίδουν κατάλληλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα των Seed και Idriss το 1970 [Seed H. B. and Idriss I. M. (1970)]. Η έρευνα απέδιδε την συμπεριφορά των δυναμικών χαρακτηριστικών που αντιστοιχούσαν σε αμμώσις σχηματισμούς σε συσχέτιση με τη διατμητική παραμόρφωση. Οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Έρευνα των Seed και Idriss το 1970	Τιμές των παραμέτρων του sig3	
	$\alpha$	1.014
	$b$	- 0.4792
	$x_0$	- 1.249

Πίνακας 4.1 Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 στην περίπτωση των Seed & Idriss για άμμο

Οι παραπάνω τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 αποδίδουν κατάλληλα το διάγραμμα 4.1.



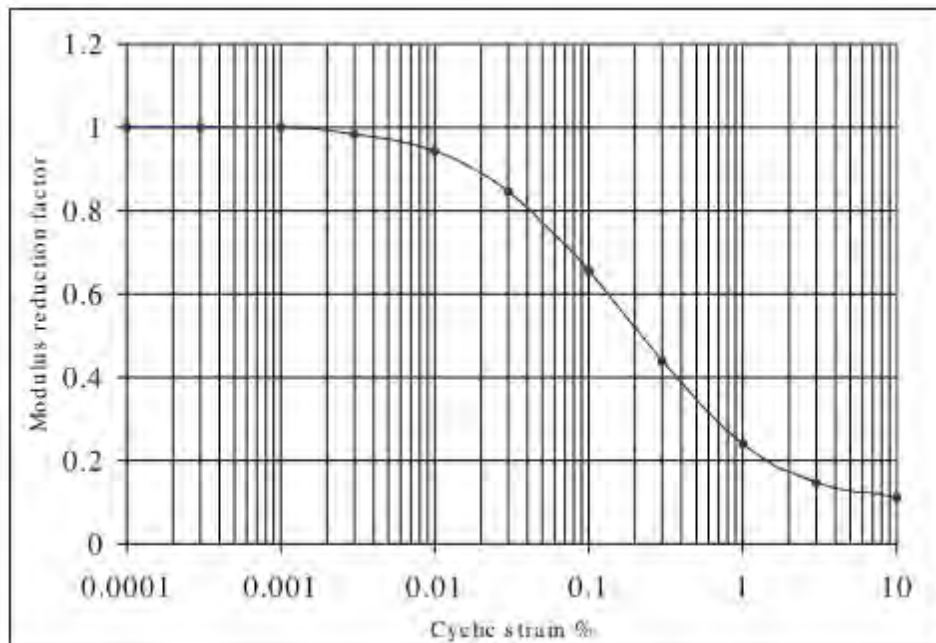
Διάγραμμα 4.1 Απεικόνιση της σχέσης μέτρου διάτμησης- παραμόρφωσης για το πάνω όριο των άμμων [Seed and Idriss (1970)]

Στο διάγραμμα 4.1 απεικονίζεται η καμπύλη του μέτρου διάτμησης με τη διατμητική παραμόρφωση, η οποία αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα των Seed και Idriss. Οι εδαφικοί σχηματισμοί που εξετάστηκαν ήταν άμμοι και συγκεκριμένα στο διάγραμμα εμφανίζεται το πάνω όριό τους.

Επιπλέον, στο εγχειρίδιο του FLAC δίνονται οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων οι οποίες αποδίδουν κατάλληλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα των Seed και Idriss, αλλά αυτή τη φορά για αργλικούς σχηματισμούς. Οι τιμές των παραμέτρων σε αυτή την περίπτωση δίνονται στον πίνακα 4.2 και το αποτέλεσμα τους εμφανίζεται στο διάγραμμα 4.2.

Έρευνα των Seed και Idriss το 1970	Τιμές των παραμέτρων του sig3	
	α	1.017
	b	-0.587
	χ <sub>0</sub>	-0.633

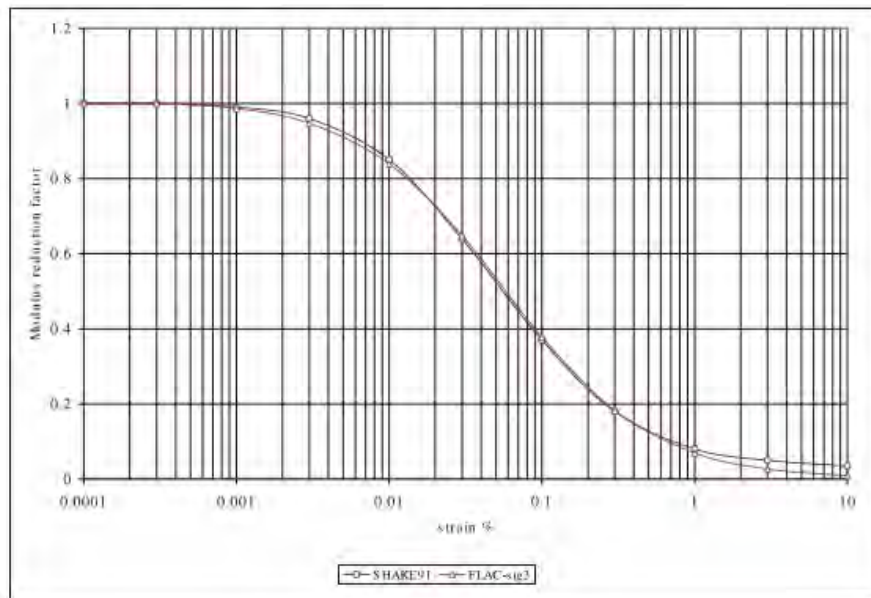
Πίνακας 4.2 Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 στην περίπτωση των Seed & Idriss για άργιλο



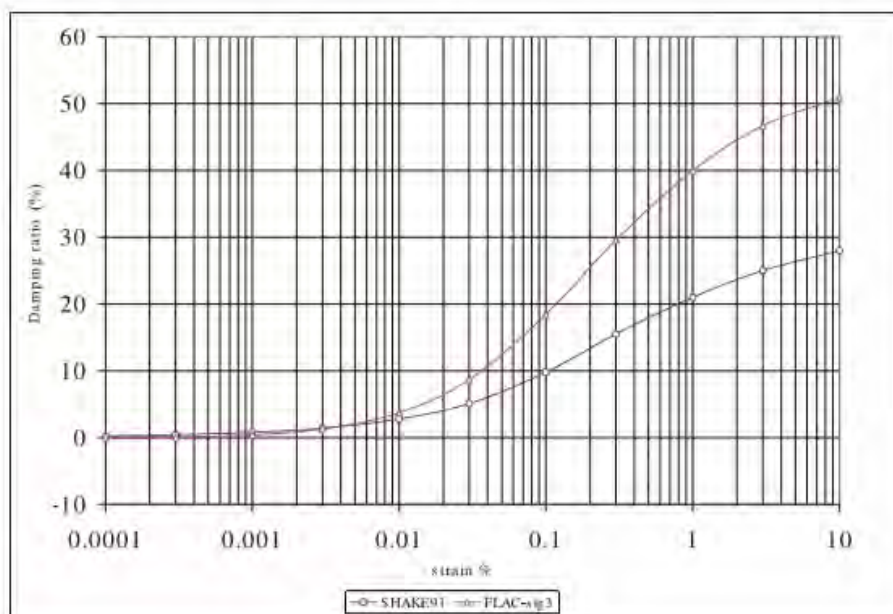
Διάγραμμα 4.2 Απεικόνιση της σχέσης μέτρου διάτμησης- παραμόρφωσης για αργίλους

[Seed and Idriss (1970)]

Τέλος, στο εγχειρίδιο του FLAC υπάρχει ένα παράδειγμα το οποίο μοιάζει να χρησιμοποιεί τη μέθοδο του 'calibration', με το μοντέλο sig3. Τα δεδομένα που συγκρίνονται είναι τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από την έρευνα των Seed και Idriss. Τα αποτελέσματα αυτού του παραδείγματος φαίνονται στα διαγράμματα 4.3 και 4.4.



Διάγραμμα 4.3 Απεικόνιση της σχέσης μέτρου διάτμησης- παραμόρφωσης με το μοντέλο sig3 και εμφάνιση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων από τους Seed και Idriss το 1970



Διάγραμμα 4.4 Απεικόνιση της σχέσης λόγου απόσβεσης-παραμόρφωσης με το μοντέλο sig3 και εμφάνιση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων από τους Seed και Idriss το 1970

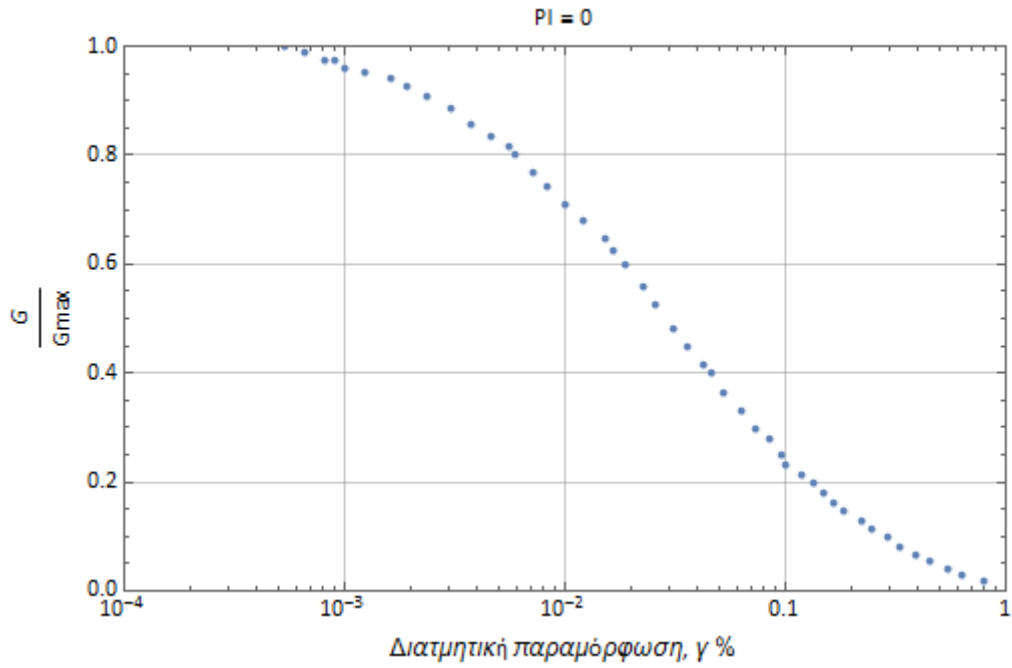
Όπως μπορεί κανείς να εντοπίσει από το διάγραμμα 4.3 η καμπύλη που αντιστοιχεί στην έρευνα των Seed και Idriss σχεδόν ταυτίζεται με την καμπύλη που προέκυψε μετά την αξιοποίηση του μοντέλου sig3. Αντίθετα, από το διάγραμμα 4.4 προκύπτει ότι οι καμπύλες παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση η οποία αγγίζει το 20% σχεδόν σε όλο το εύρος των διατμητικών παραμορφώσεων. Ταύτιση των δύο καμπυλών παρατηρείται μόνο στις μικρές παραμορφώσεις μέχρι περίπου της τάξης του 0.01%.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

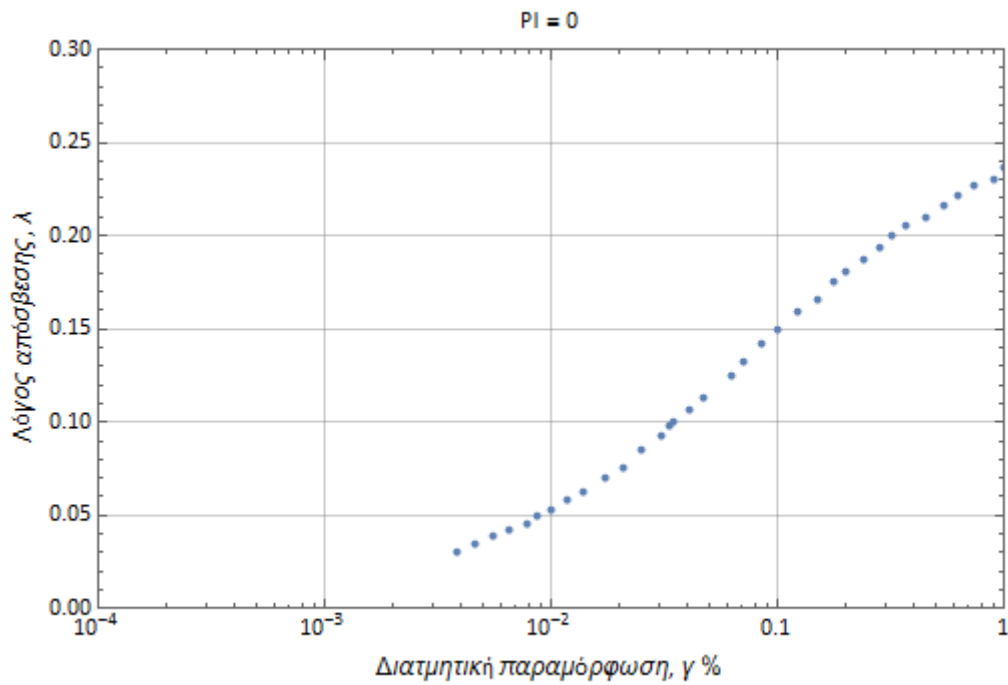
### 5.1 Αποτύπωση των πειραματικών καμπυλών

Αρχικό στάδιο της εργασίας αποτέλεσε η διαδικασία αποτύπωσης των γνωστών καμπυλών, δηλαδή αυτών που προέκυψαν από τα πειράματα των Mladen Vucetic και Ricardo Dobry σε ηλεκτρονική μορφή. Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την περίπτωση, αλλά και στο μεγαλύτερο κομμάτι εκτέλεσης της εργασίας είναι το Mathematica. Κάθε καμπύλη αναπαριστάται από σημεία τα οποία βρέθηκαν και σημειώθηκαν στο πρόγραμμα Mathematica μέσω λογαριθμικής παρεμβολής. Στις επόμενες σελίδες, παρουσιάζονται τα διαγράμματα τα οποία περιλαμβάνουν τις καμπύλες του  $G/G_{max}$  με τη διατμητική παραμόρφωση και τα διαγράμματα που περιλαμβάνουν το λόγο απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση, σε συσχέτιση πάντα με το δείκτη πλαστικότητας. Μετά την αρχική αποτύπωση, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές προκειμένου τα διαγράμματα να ταυτίζονται όσο το δυνατόν περισσότερο με τα αρχικά. Ωστόσο, είναι πιθανό να υπάρχουν μικρές αποκλίσεις, καθώς η αποτύπωση έγινε με τη χρήση γνώμονα. Τα διαγράμματα εμφανίζονται ξεκινώντας από τον μικρότερο δείκτη πλαστικότητας, δηλαδή το 0 και ολοκληρώνονται με τον μέγιστο, δηλαδή το 200. Στο τέλος της υποενότητας εμφανίζονται όλες οι καμπύλες σε ένα διάγραμμα, όπως ακριβώς και στα πειραματικά αποτελέσματα των Vucetic και Dobry.

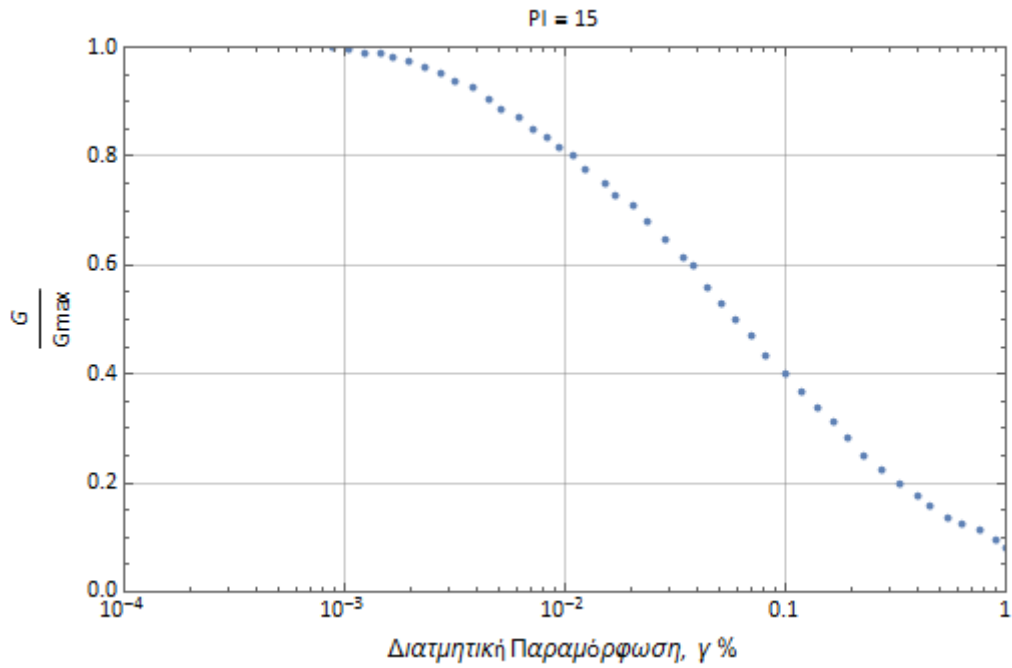




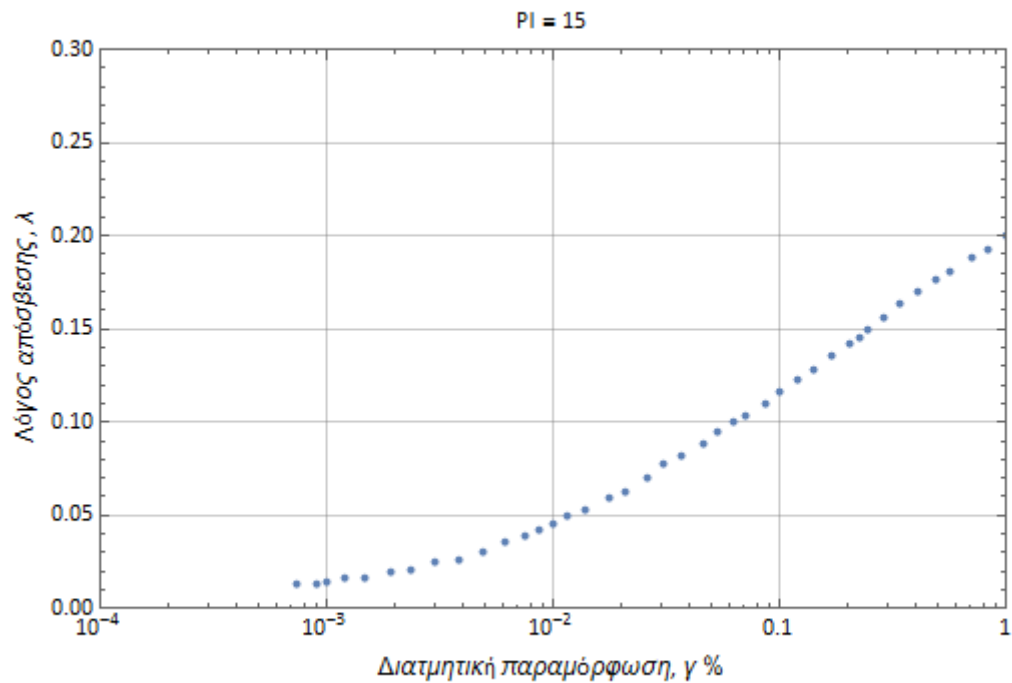
Διάγραμμα 5.1 Καμπύλη του  $G/G_{max}$  με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=0$



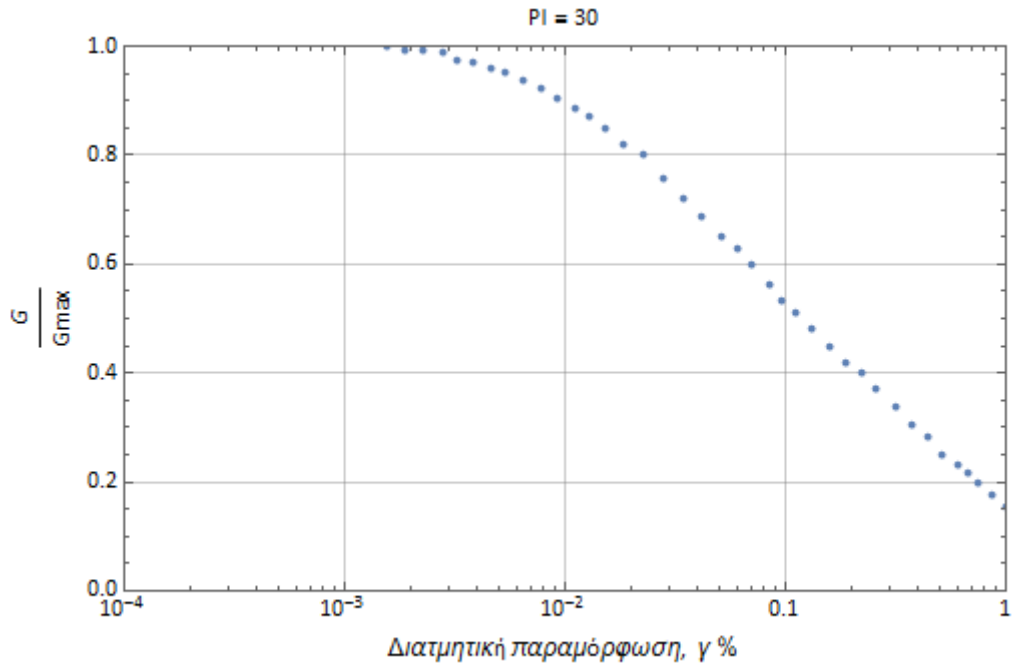
Διάγραμμα 5.2 Καμπύλη του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=0$



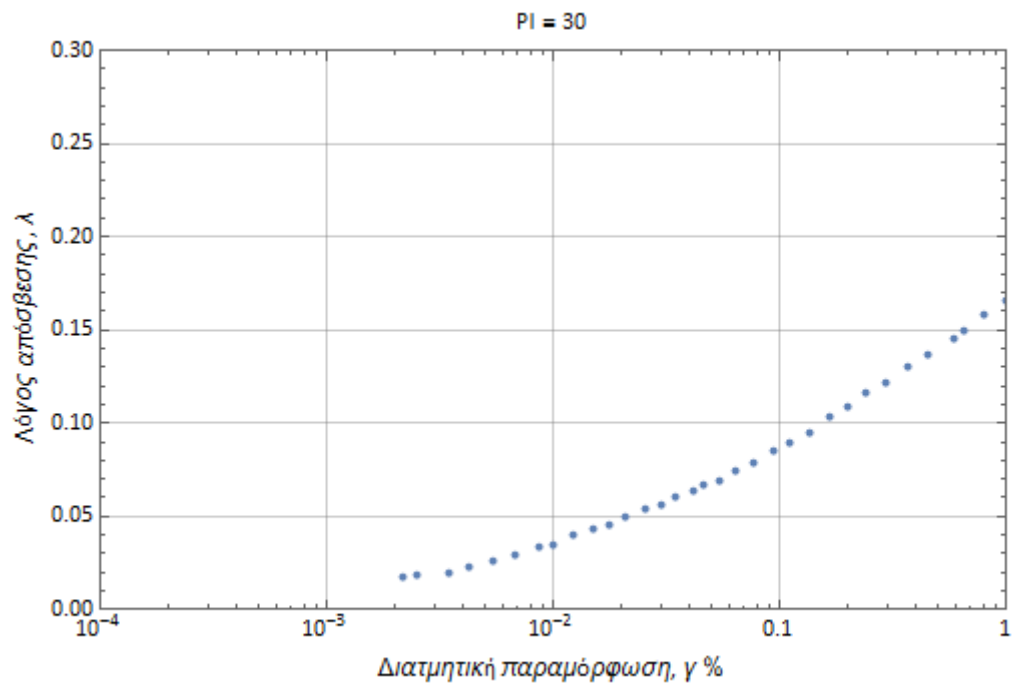
Διάγραμμα 5.3 Καμπύλη του  $G/G_{max}$  με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=15$



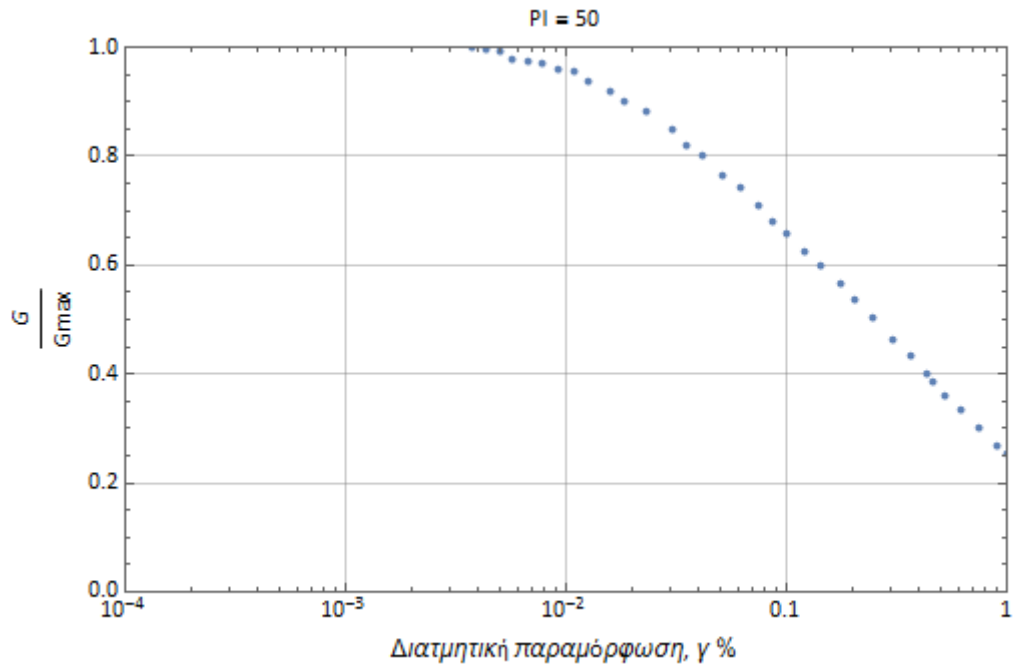
Διάγραμμα 5.4 Καμπύλη του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=15$



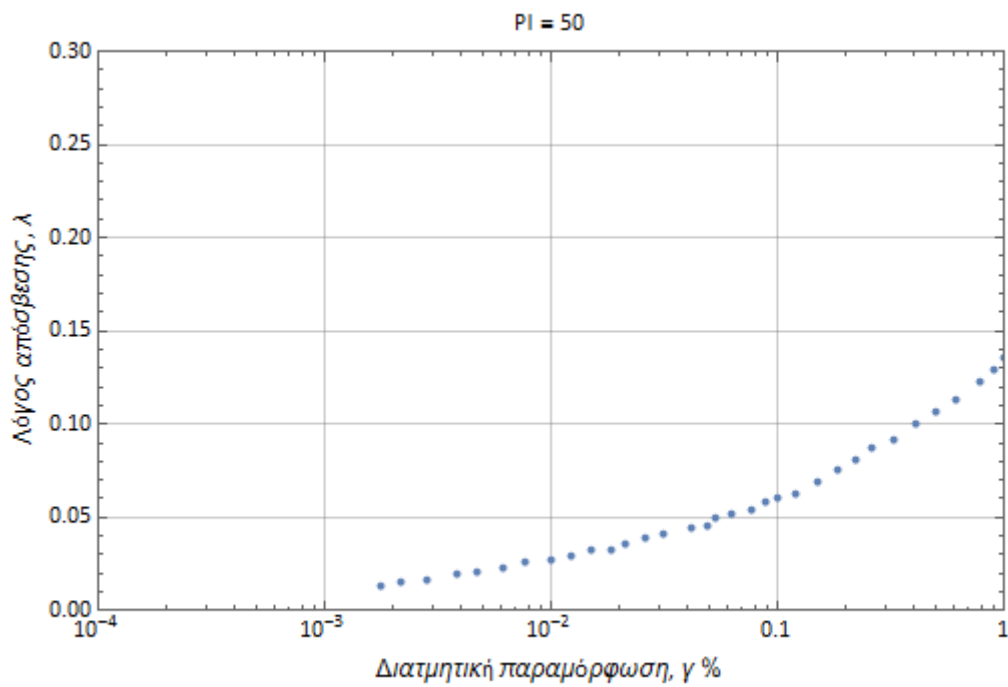
Διάγραμμα 5.5 Καμπύλη του  $G/G_{max}$  με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=30$



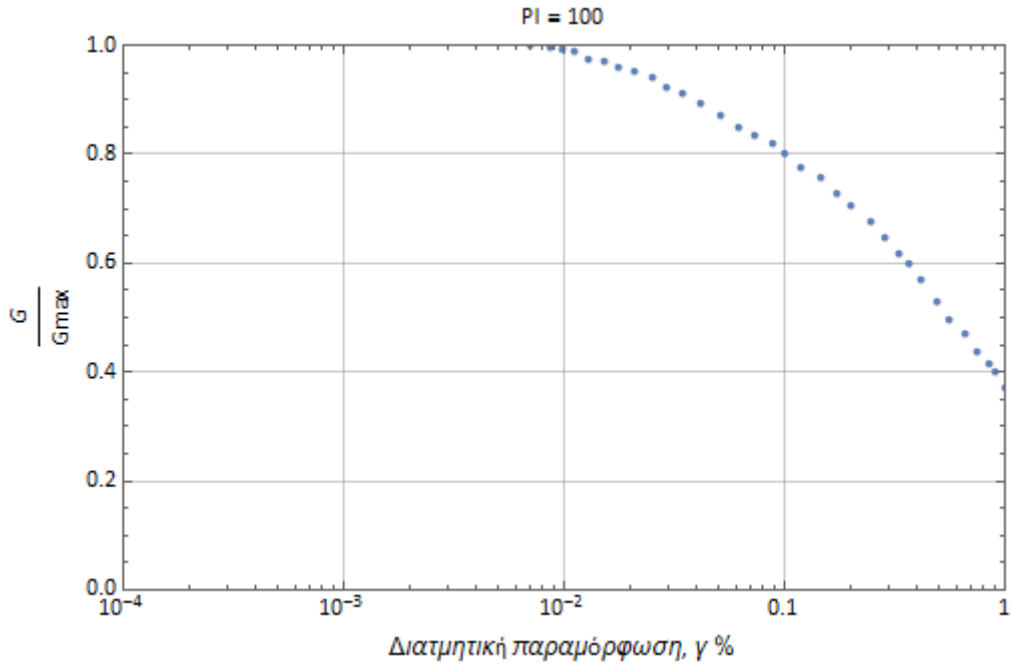
Διάγραμμα 5.6 Καμπύλη του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=30$



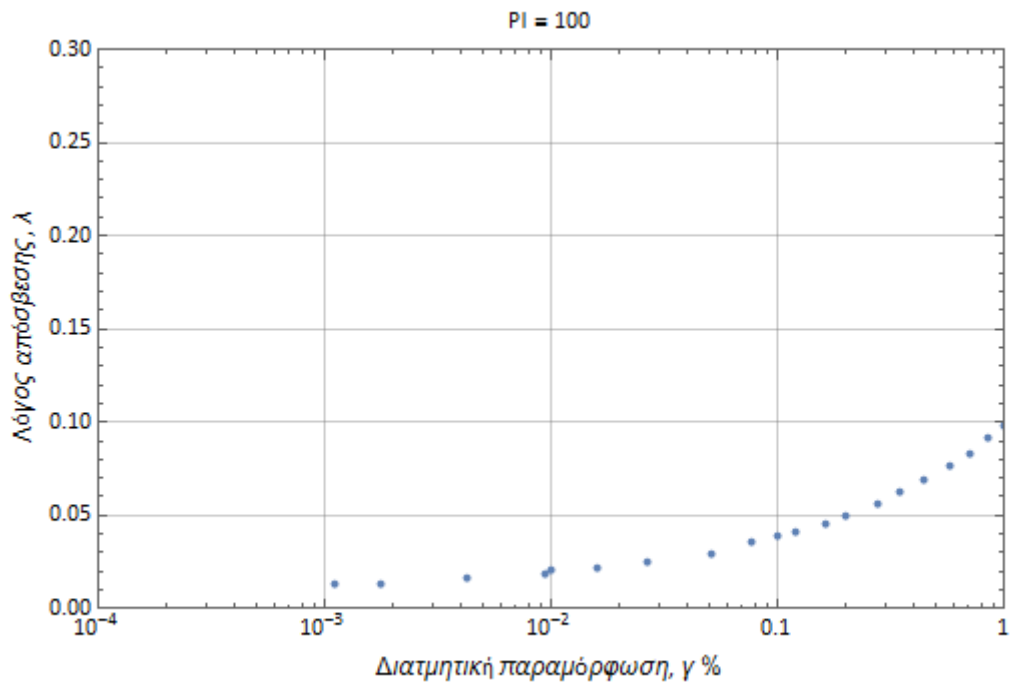
Διάγραμμα 5.7 Καμπύλη του  $G/G_{max}$  με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=50$



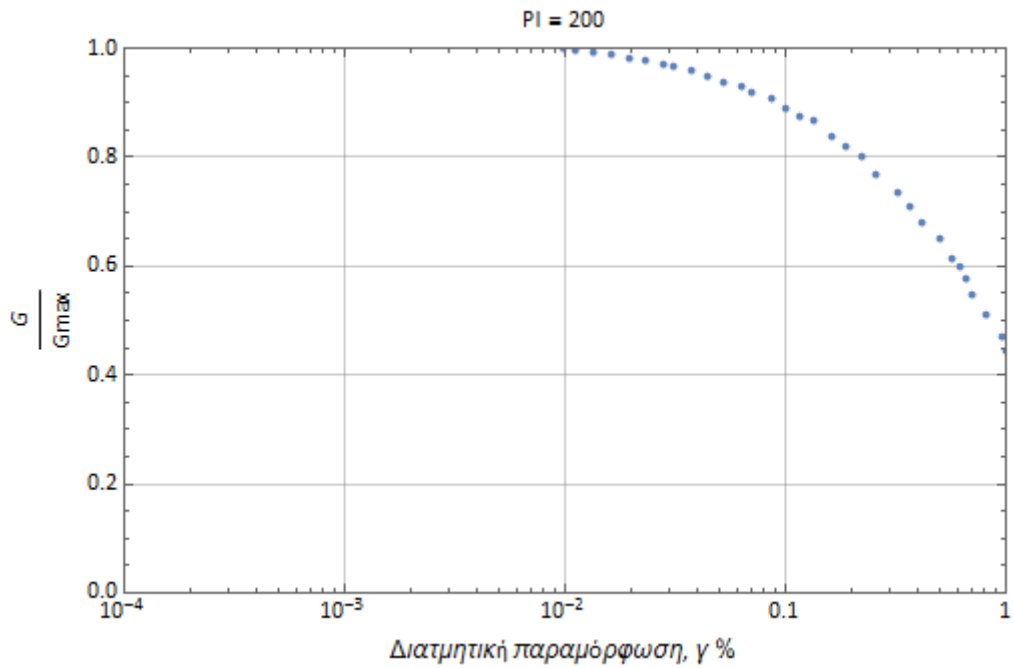
Διάγραμμα 5.8 Καμπύλη του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=50$



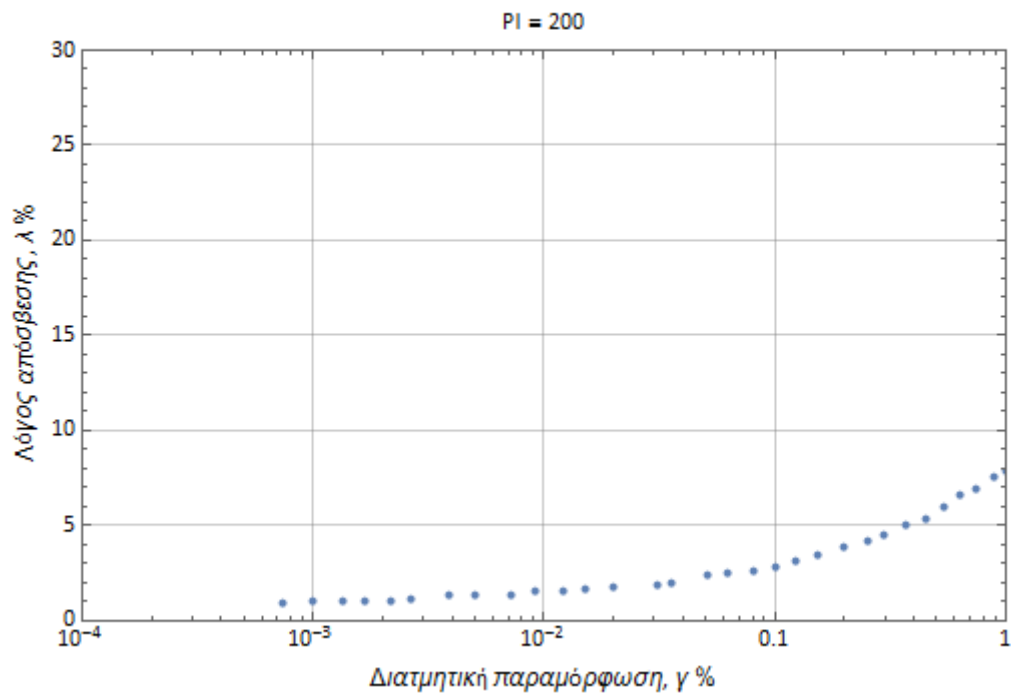
Διάγραμμα 5.9 Καμπύλη του  $G/G_{max}$  με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=100$



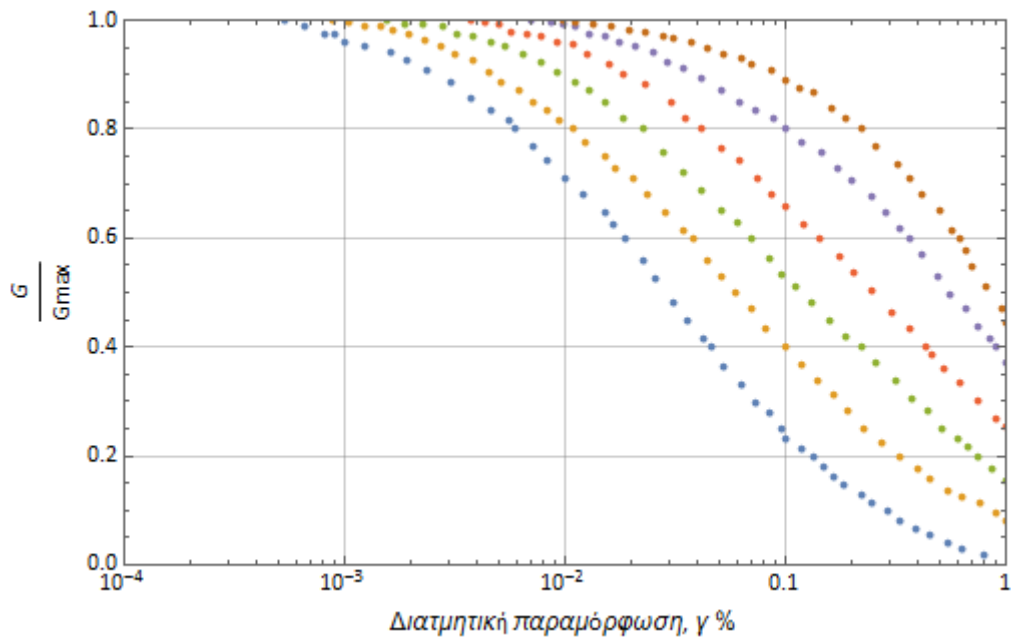
Διάγραμμα 5.10 Καμπύλη του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=100$



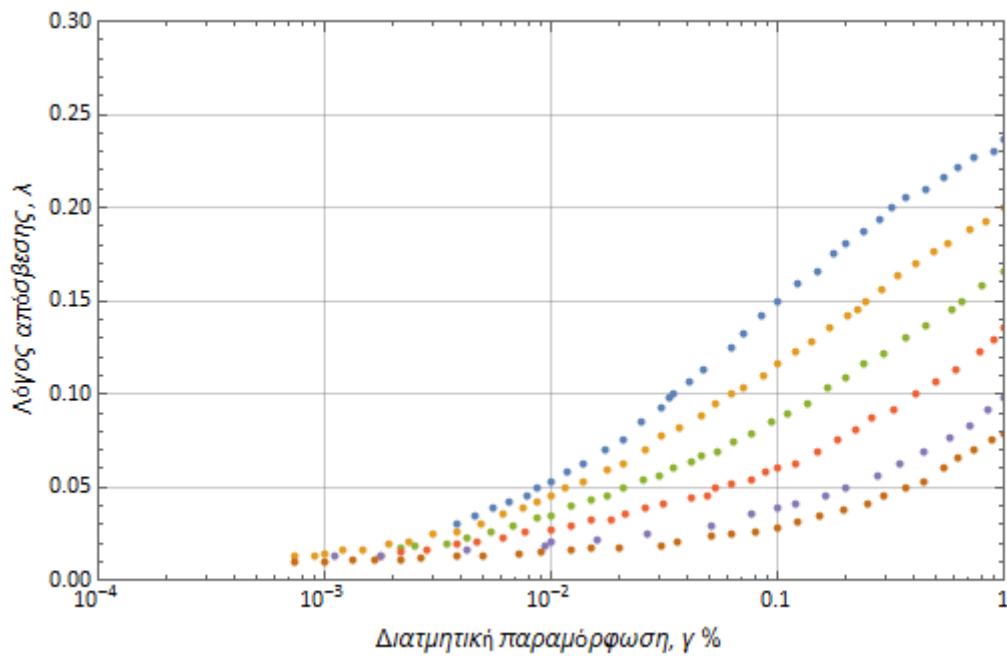
Διάγραμμα 5.11 Καμπύλη του  $G/G_{max}$  με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=200$



Διάγραμμα 5.12 Καμπύλη του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση για  $PI=200$



Διάγραμμα 5.13 Συνολικά οι καμπύλες του  $G/G_{max}$  με τη διατμητική παραμόρφωση για όλους τους δείκτες πλαστικότητας



Διάγραμμα 5.14 Συνολικά οι καμπύλες του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση για όλους τους δείκτες πλαστικότητας

Παρατηρείται, ότι στα παραπάνω διαγράμματα ο άξονας της διατμητικής παραμόρφωσης ολοκληρώνεται για παραμόρφωση 1% και όχι 10%, όπως στα διαγράμματα των Vucetic και Dobry. Αυτό συμβαίνει γιατί ουσιαστικά αυτή είναι και η μέγιστη παραμόρφωση που μπορεί κανείς να αναμένει. Άλλωστε και τα αρχικά διαγράμματα περιλαμβάνουν παραμορφώσεις λίγο μεγαλύτερες του 1%. Επίσης, γίνεται εμφανές ότι ο κατακόρυφος άξονας του λόγου απόσβεσης δεν εμφανίζεται με ποσοστό επί τις εκατό, όπως στα αρχικά διαγράμματα. Αυτό συμβαίνει για λόγους οι οποίοι αφορούν την καλύτερη εκτέλεση του κώδικα μέσα στο πρόγραμμα.



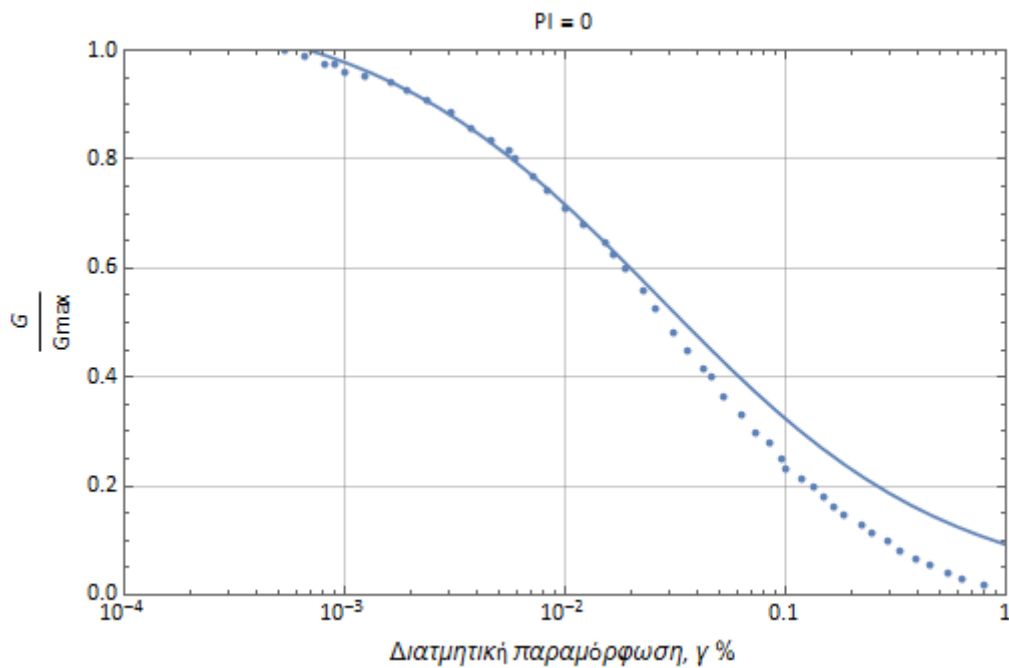
## 5.2 Εφαρμογή του κώδικα-Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Αφού συντάχθηκε ο κατάλληλος κώδικας, ο οποίος υπάρχει στο παράρτημα του τεύχους, ξεκίνησε η εφαρμογή του για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εύρεση τους είναι η εξής: για κάθε ζευγάρι καμπυλών που ανήκαν στον ίδιο δείκτη πλαστικότητας εφαρμόστηκε το μοντέλο και έγινε προσπάθεια να ταυτιστεί η καμπύλη που δημιουργήθηκε από αυτό με την αντίστοιχη από την παλαιότερη έρευνα. Η προσαρμογή της καμπύλης γινόταν δίνοντας κάθε φορά διαφορετική τιμή στις παραμέτρους  $a, b$  και  $x_0$  του κώδικα sig3. Προκειμένου να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων, έτσι ώστε οι καμπύλες να ταυτίζονται όσο το δυνατόν καλύτερα διεξάχθηκαν πολλές δοκιμές για κάθε ζευγάρι καμπυλών. Για κάθε ζευγάρι διαγραμμάτων οι καμπύλες έπρεπε να ταυτίζονται ταυτόχρονα και στα δύο, δηλαδή στο διάγραμμα του μέτρου διάτμησης με την παραμόρφωση και σε αυτό του λόγου απόσβεσης με την παραμόρφωση. Εκεί έγκειται και η μεγάλη δυσκολία, καθώς η καμπύλη που αντιστοιχούσε στο μέτρο διάτμησης και αυτή του λόγου απόσβεσης παρουσίαζαν διαφορετική συμπεριφορά.

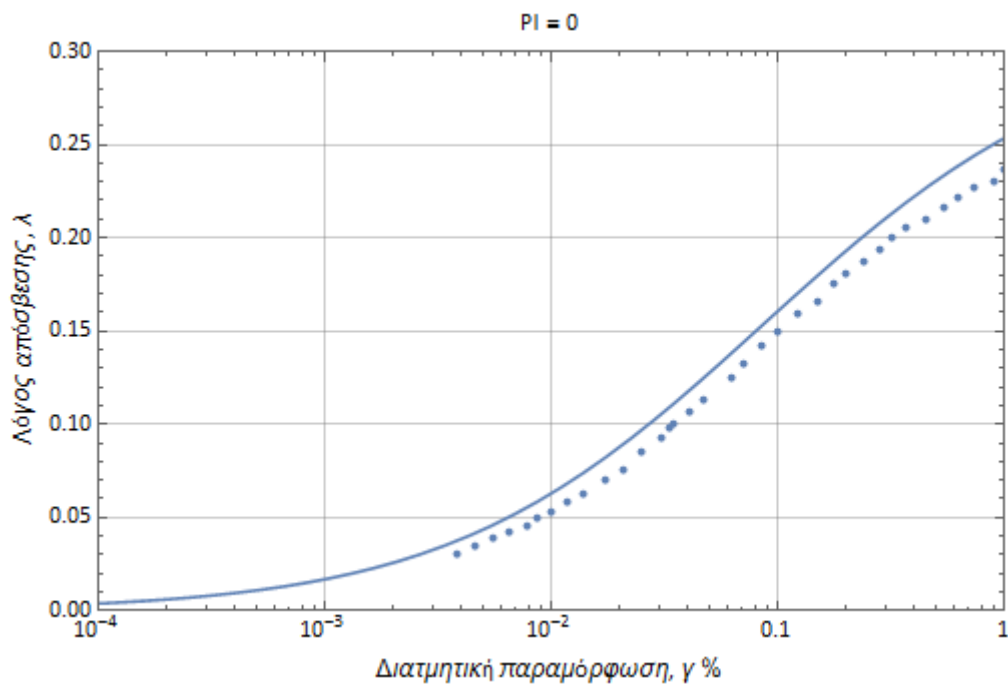
Τα αποτελέσματα τα οποία κρίθηκαν κατάλληλα για την επίτευξη του στόχου της διπλωματικής, παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες. Σε κάθε διάγραμμα η συνεχόμενη μπλε καμπύλη είναι αυτή που προέκυψε από το μοντέλο sig3, ενώ η καμπύλη που δημιουργείται από τα συνεχόμενα σημεία αντιστοιχεί σε αυτή που προέκυψε από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν από τους Vucetic και Dobry.

### 5.2.1 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας $PI=0$

Η πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε στη διπλωματική ήταν αυτή των καμπυλών με πλαστικότητα ίση με το μηδέν. Όπως προαναφέρθηκε οι καμπύλες αυτές καταδεικνύουν τη συμπεριφορά των μη συνεκτικών εδαφών, δηλαδή των άμμων και των χαλικιών. Μετά από πολλές δοκιμές τα τελικά αποτελέσματα φαίνονται στη συνέχεια.



Διάγραμμα 5.15 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης διάτμησης-παραμόρφωσης για  $PI=0$  με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα



Διάγραμμα 5.16 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης λόγου απόσβεσης-παραμόρφωσης για  $PI=0$  με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα

Τα διαγράμματα 5.15 και 5.16 θεωρήθηκαν τα πιο κατάλληλα για την περίπτωση των εδαφών με μηδενική πλαστικότητα. Οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων  $a, b$  και  $x_0$  από τις οποίες προέκυψαν τα τελικά αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.1.

Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για $PI=0$	
$a$	1.09
$b$	-0.66
$x_0$	-1.57

Πίνακας 5.1 Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου για δείκτη πλαστικότητας  $PI=0$

Παρατηρώντας τα τελικά διαγράμματα γίνεται φανερό ότι δεν υπάρχει πλήρης ταύτιση μεταξύ των καμπυλών που δημιουργήθηκαν από το μοντέλο sig3 και των καμπυλών που προέκυψαν από τα παλαιότερα διαγράμματα. Ωστόσο, αυτά αποτελούν το καταλληλότερο δείγμα καθώς στις υπόλοιπες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν οι αποκλίσεις ήταν ακόμα μεγαλύτερες.

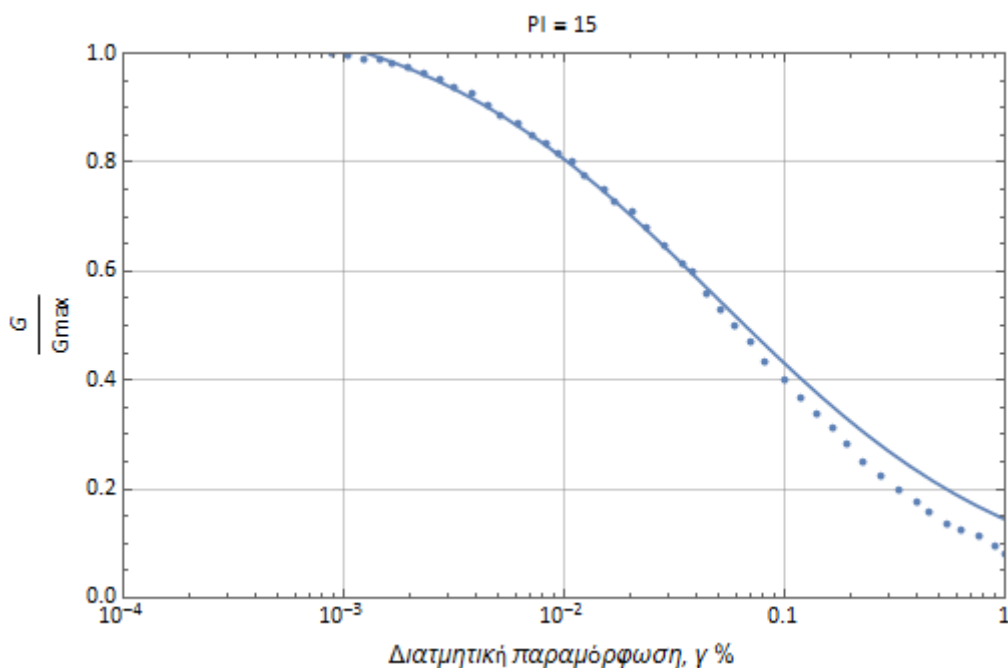
Στο διάγραμμα 5.15 οι δύο καμπύλες ταυτίζονται μέχρι και για παραμόρφωση σχεδόν 0.03% και από εκεί μέχρι και το 1% αρχίζει να εμφανίζεται απόκλιση μεταξύ τους. Στην αρχή η απόκλιση χαρακτηρίζεται μικρή, ενώ στην πορεία αυξάνεται με μέγιστη τιμή απόκλισης 10%.

Στο διάγραμμα 5.16 δεν παρατηρείται ταύτιση των καμπυλών σε κανένα κομμάτι του διαγράμματος. Αντίθετα, υπάρχει μία συνεχή απόκλιση. Για διατμητική παραμόρφωση μέχρι και 0.01% η απόκλιση είναι περίπου 0.4%. Για παραμόρφωση μέχρι και 0.2% η απόκλιση αυξάνεται στο 1.4%. Από εκεί μέχρι και για παραμόρφωση 1% η απόκλιση φτάνει στο 2%.

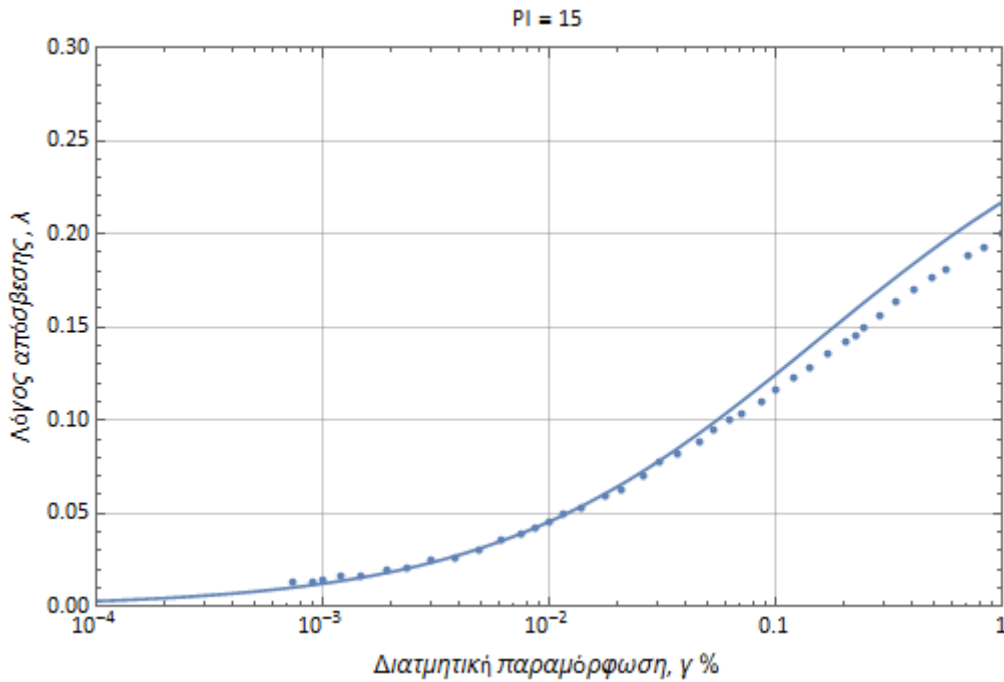
Συγκρίνοντας, τα αποτελέσματα των δύο διαγραμμάτων προκύπτει ότι αν και στο διάγραμμα του λόγου απόσβεσης δεν παρατηρείται ταύτιση σε κανένα κομμάτι του διαγράμματος, η μέγιστη απόκλιση συμβαίνει στο διάγραμμα του μέτρου διάτμησης (10%).

### 5.2.2 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας PI=15

Το επόμενο ζευγάρι καμπυλών που εξετάστηκε είναι αυτό που αντιστοιχούσε σε δείκτη πλαστικότητας ίσο με δεκαπέντε. Τα εδάφη που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία κατέχουν μέση πλαστικότητα. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι τα εδάφη με αυτό το δείκτη πλαστικότητας καθώς και όλα τα υπόλοιπα που εξετάστηκαν και αναλύονται παρακάτω είναι συνεκτικά εδάφη, δηλαδή άργιλοι. Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση φαίνονται στα διαγράμματα 5.17 και 5.18.



Διάγραμμα 5.17 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης διάτμησης-παραμόρφωσης για PI=15 με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα



Διάγραμμα 5.18 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης λόγου απόσβεσης-παραμόρφωσης για  $PI=15$  με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα

Τα διαγράμματα 5.17 και 5.18 προέκυψαν από τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων  $a, b$  και  $x_0$  που εμφανίζονται στον πίνακα 5.2.

Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για $PI=15$	
$a$	1.1
$b$	- 0.69
$x_0$	- 1.305

Πίνακας 5.2 Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου για δείκτη πλαστικότητας  $PI=15$

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, τα οποία προέκυψαν για δείκτη πλαστικότητας ίσο με δεκαπέντε, γίνεται φανερό ότι υπάρχει ταύτιση των δύο καμπυλών για μεγάλο κομμάτι των παραμορφώσεων.

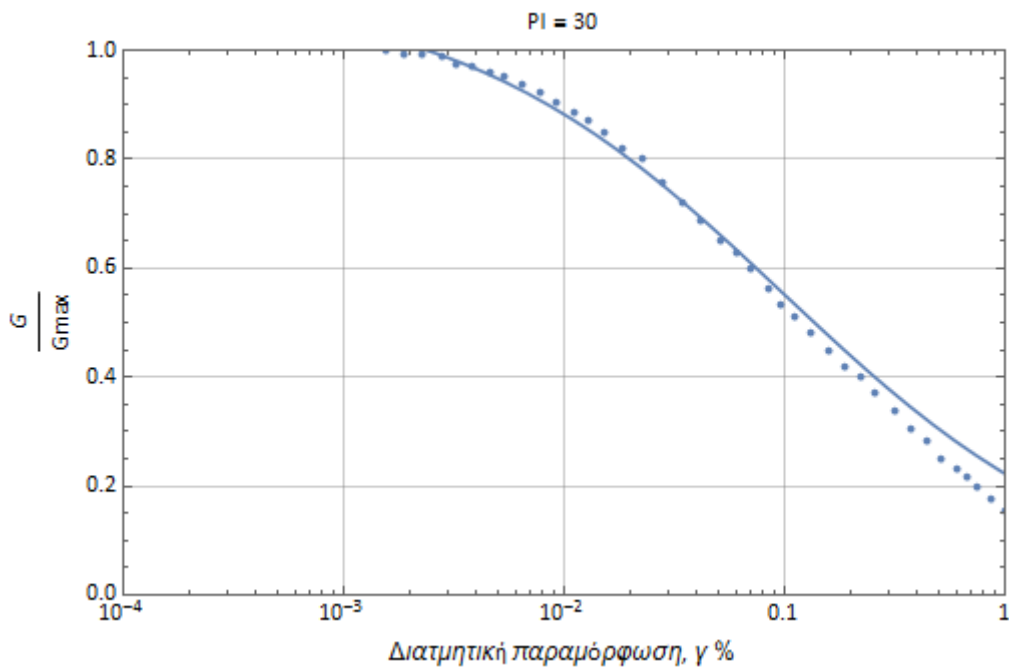
Πιο συγκεκριμένα, στο διάγραμμα του μέτρου διάτμησης με τη διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή το 5.17, οι δύο καμπύλες ταυτίζονται μέχρι και για παραμόρφωση 0.07%. Από εκεί και πέρα αρχίζει να υπάρχει απόκλιση μεταξύ των καμπυλών. Για παραμόρφωση μικρότερη του 0.2% η απόκλιση είναι 4%. Τέλος, για παραμόρφωση μέχρι 1% η απόκλιση φτάνει το 6%.

Στο διάγραμμα του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή το 5.18, υπάρχει ταύτιση των δύο καμπυλών για παραμόρφωση που φτάνει το 0.07%. Στο κομμάτι του διαγράμματος που φτάνει το 0.1% εμφανίζεται απόκλιση της τάξης του 1%. Για παραμόρφωση μικρότερη του 0.2% η απόκλιση είναι 1.3%. Για παραμόρφωση μέχρι και 0.4% η απόκλιση αυξάνεται στο 1.5%. Τελικά, η απόκλιση για παραμόρφωση 1% αγγίζει το 1.7%.

Σε αυτή την περίπτωση των διαγραμμάτων η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στο πρώτο διάγραμμα (6%).

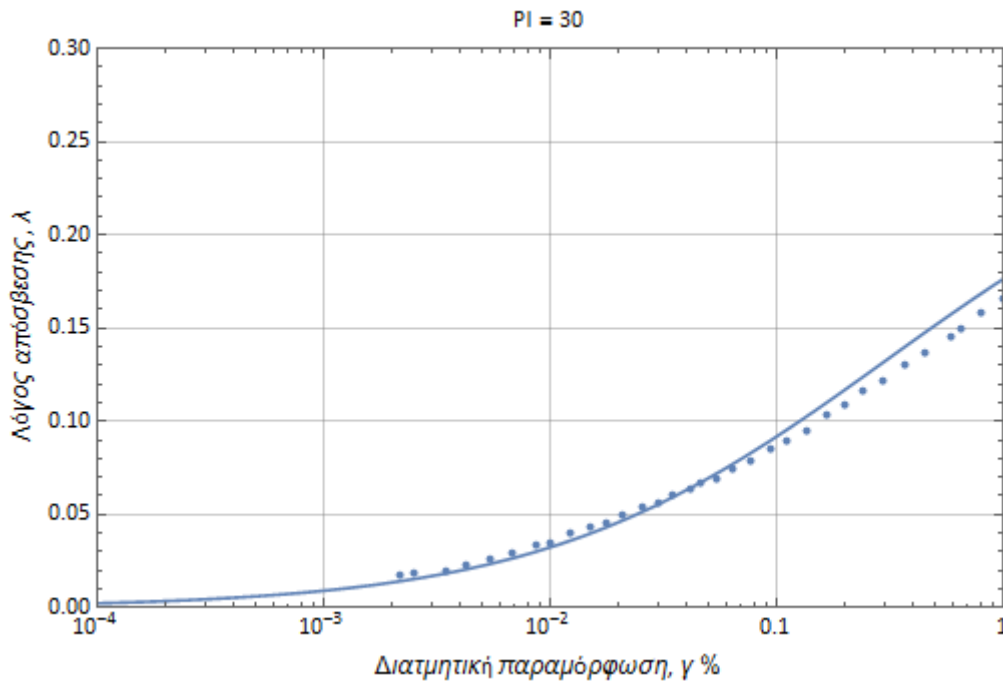
### 4.2.3 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας $PI=30$

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για εδάφη που έχουν δείκτη πλαστικότητας ίσο με τριάντα. Τα εδάφη αυτά θεωρείται ότι έχουν μεγάλη πλαστικότητα, σύμφωνα πάντα με τον πίνακα 2.1. Τα τελικά αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα 5.19 και 5.20.



Διάγραμμα 5.19 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης διάτμησης-παραμόρφωσης για  $PI=30$  με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα





Διάγραμμα 5.20 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης λόγου απόσβεσης-παραμόρφωσης για  $PI=30$  με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα

Οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων  $a, b$  και  $x_0$  από τις οποίες προέκυψαν τα διαγράμματα 5.19 και 5.20, για την περίπτωση των εδαφών με πλαστικότητα ίση με τριάντα, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για $PI=30$	
$\alpha$	1.11
$b$	-0.73
$x_0$	-1.01

Πίνακας 5.3 Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για δείκτη πλαστικότητας  $PI=30$

Στα διαγράμματα 5.19 και 5.20 φαίνεται ότι υπάρχει ταύτιση των δύο καμπυλών σχεδόν σε όλο το εύρος των παραμορφώσεων.

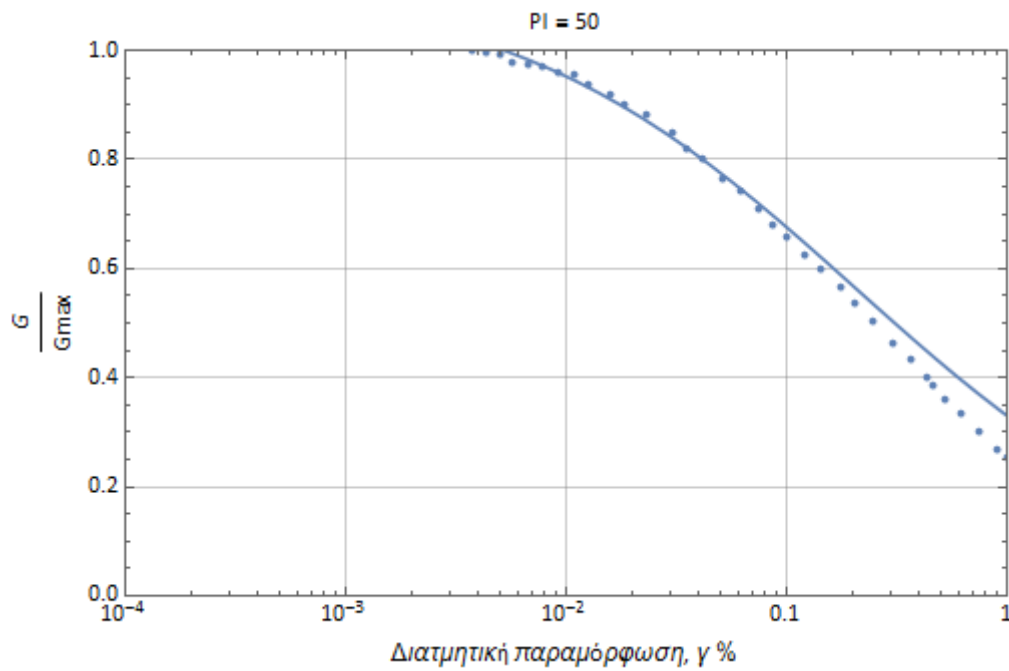
Στο διάγραμμα 5.19 η ταύτιση των δύο καμπυλών συμβαίνει για παραμόρφωση μέχρι και 0.1%. Για παραμόρφωση μικρότερη του 0.3% εμφανίζεται μια μικρή απόκλιση της τάξης του 2.5%. Στη συνέχεια, η απόκλιση αυξάνεται και φτάνει το 8% για παραμόρφωση 1%.

Στο διάγραμμα 5.20 παρατηρείται ταύτιση των δύο καμπυλών για παραμόρφωση μέχρι και περίπου 0.1%. Στη συνέχεια, εμφανίζεται μια μικρή απόκλιση μεγέθους 0.5%. Η μέγιστη απόκλιση αγγίζει το 1% για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 0.5%.

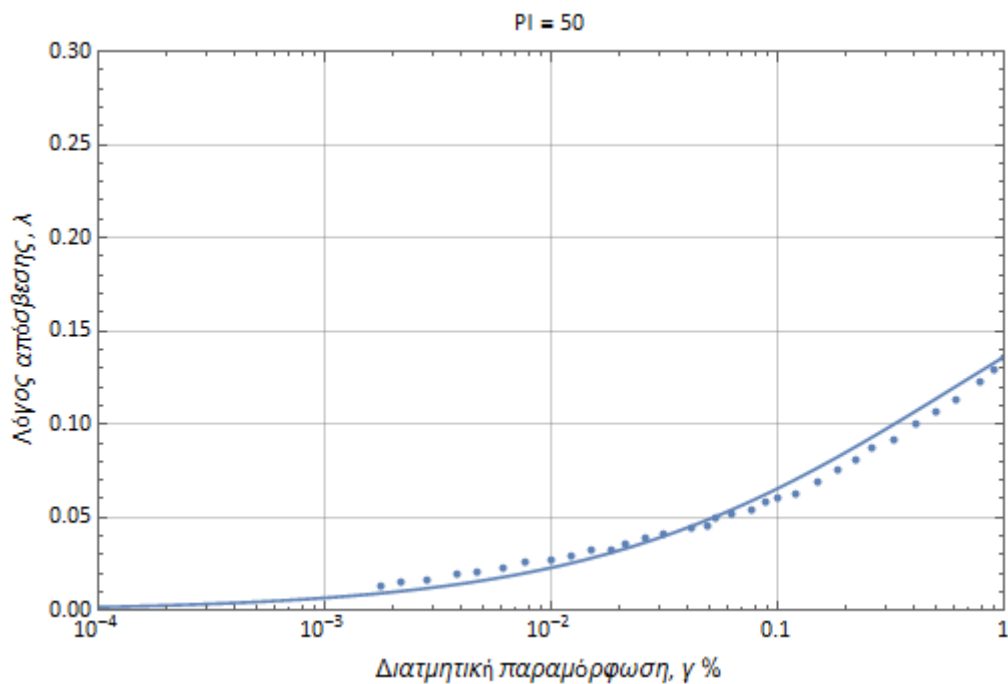
Συγκρίνοντας και εδώ τα διαγράμματα φαίνεται ότι η μέγιστη απόκλιση παρατηρείται και πάλι στο διάγραμμα του μέτρου διάτμησης (8%).

### 5.2.4 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας PI=50

Σε αυτό το κομμάτι της διπλωματικής εξετάστηκαν τα εδάφη που κατέχουν πλαστικότητα ίση με πενήντα. Τα εδάφη αυτά εμφανίζουν πολύ μεγάλη πλαστικότητα. Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται στα διαγράμματα 5.21 και 5.22.



Διάγραμμα 5.21 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης διάτμησης-παραμόρφωσης για PI=50 με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα



Διάγραμμα 5.22 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης λόγου απόσβεσης-παραμόρφωσης για  $PI=50$  με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα

Τα διαγράμματα 5.21 και 5.22 προέκυψαν από τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων  $a, b$  και  $x_0$  οι οποίες εμφανίζονται στον πίνακα 5.4.

Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για $PI=50$	
$a$	1.13
$b$	- 0.78
$x_0$	- 0.69

Πίνακας 5.4 Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για δείκτη πλαστικότητας  $PI=50$

Παρατηρώντας τα διαγράμματα τα οποία αντιστοιχούν στα εδάφη με δείκτη πλαστικότητας ίσο με πενήντα προκύπτει ότι υπάρχει ταύτιση των καμπυλών, ενώ αποκλίσεις κάποιου βαθμού εμφανίζονται μόνο στο διάγραμμα 5.21.

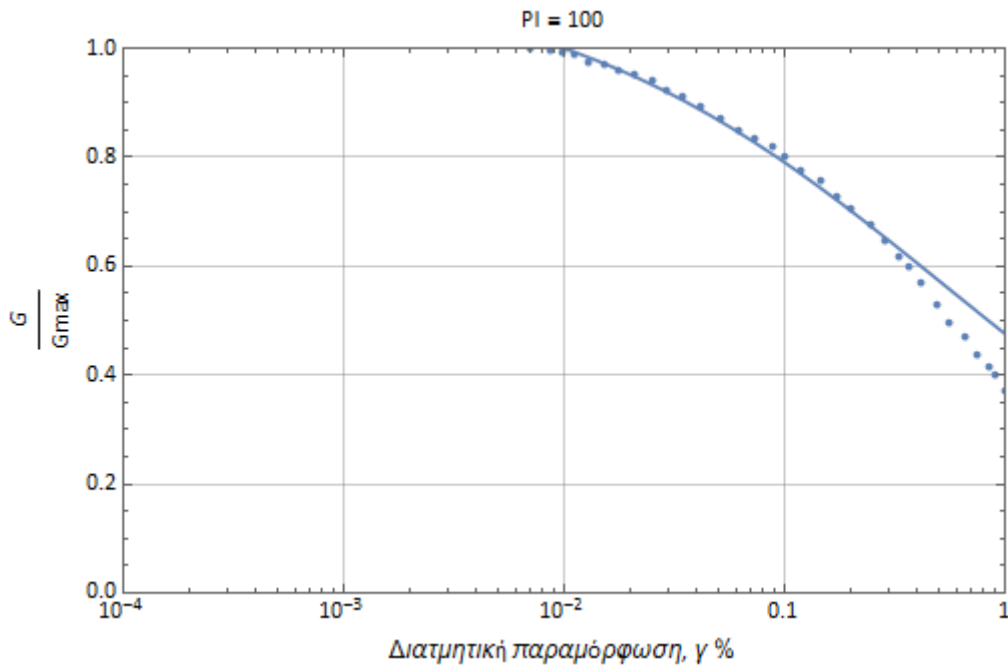
Πιο συγκεκριμένα στο διάγραμμα 5.21 υπάρχει ταύτιση των δύο καμπυλών για παραμόρφωση μέχρι και περίπου 0.2%. Στη συνέχεια, αρχίζει να εμφανίζεται σταδιακά απόκλιση μεταξύ των καμπυλών. Αρχικά, παρατηρείται απόκλιση της τάξης του περίπου 3.5%. Αυτή ισχύει για διατμητική παραμόρφωση μέχρι και 0.4%. Μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται στο διάστημα από 0.5% μέχρι 1%, με την μέγιστη να φτάνει το 8.3%.

Στο διάγραμμα 5.22 παρατηρείται ταύτιση των δύο καμπυλών σε όλο σχεδόν το εύρος των διατμητικών παραμορφώσεων. Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται για παραμορφώσεις μέχρι 0.008% και για παραμορφώσεις από περίπου 0.12% μέχρι 0.5% χαρακτηρίζονται μικρές. Στο πρώτο κομμάτι η μέγιστη παραμόρφωση είναι 0.3%, ενώ στο δεύτερο είναι 0.5%.

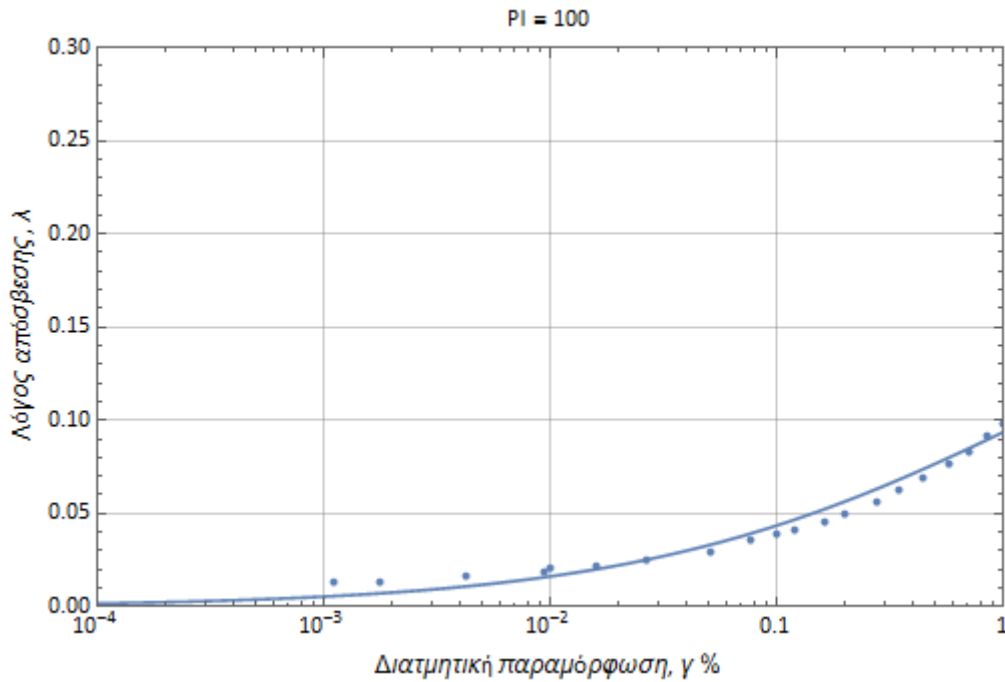
Στην περίπτωση των αποτελεσμάτων για δείκτη πλαστικότητας ίσο με πενήντα, η μέγιστη απόκλιση συμβαίνει και πάλι στο πρώτο διάγραμμα (8.3%).

### 5.2.5. Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας PI=100

Σε αυτό το στάδιο της διπλωματικής εξετάστηκαν τα εδάφη που χαρακτηρίζονται από δείκτη πλαστικότητας ίσο με εκατό. Τα εδάφη αυτά θεωρούνται ως εδάφη με πολύ μεγάλη πλαστικότητα, όπως και αυτά της υποενότητας 5.2.4. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα 5.23 και 5.24.



Διάγραμμα 5.23 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης διάτμησης-παραμόρφωσης για PI=100 με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα



Διάγραμμα 5.24 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης λόγου απόσβεσης-παραμόρφωσης για  $PI=100$  με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα

Οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων  $a, b$  και  $x_0$  από τις οποίες προέκυψαν τα διαγράμματα 4.23 και 5.24 παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5.

Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για $PI=100$	
$a$	1.14
$b$	- 0.87
$x_0$	- 0.29

Πίνακας 5.5 Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για δείκτη πλαστικότητας  $PI=100$

Παρατηρώντας τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε δείκτη πλαστικότητας ίσο με εκατό, προκύπτει ότι σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των δύο καμπυλών εμφανίζονται μόνο στο διάγραμμα 5.23.

Συγκεκριμένα στο διάγραμμα 5.23 οι δύο καμπύλες ταυτίζονται μέχρι και για παραμόρφωση 0.3%. Στη συνέχεια, δημιουργούνται αποκλίσεις μέχρι και το τέλος του διαγράμματος, δηλαδή για παραμόρφωση 1%. Μέχρι και για παραμόρφωση 0.4%, η απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών είναι μικρή, της τάξης του περίπου 3%. Η μέγιστη απόκλιση παρατηρείται στο διάστημα από 0.5% μέχρι 1% και η τιμή της είναι 11%.

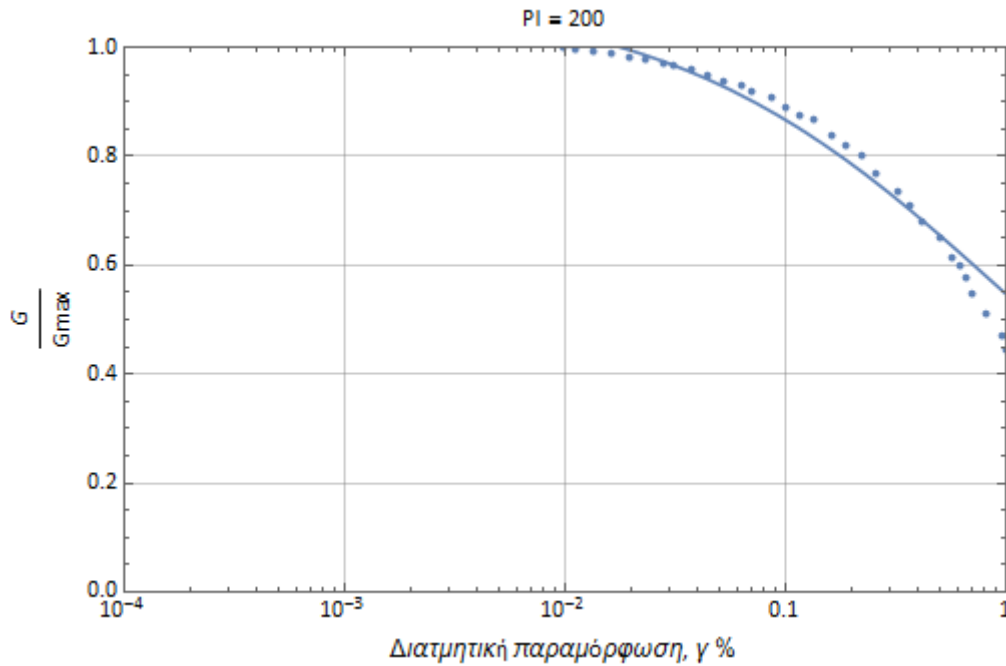
Στο διάγραμμα 5.24 υπάρχει απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών για το διάστημα παραμορφώσεων από 0.001% μέχρι 0.005%. Η τιμή αυτής της απόκλισης φτάνει το 0.3%. Στο κομμάτι του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε παραμορφώσεις από περίπου 0.006% μέχρι 0.08%, οι δύο καμπύλες ταυτίζονται πλήρως. Στη συνέχεια, παρατηρείται μία μικρή απόκλιση μεγέθους 0.6%, ενώ στο τέλος του διαγράμματος οι καμπύλες ταυτίζονται ξανά.

Και σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη απόκλιση συμβαίνει στο διάγραμμα του μέτρου διάτμησης (11%).

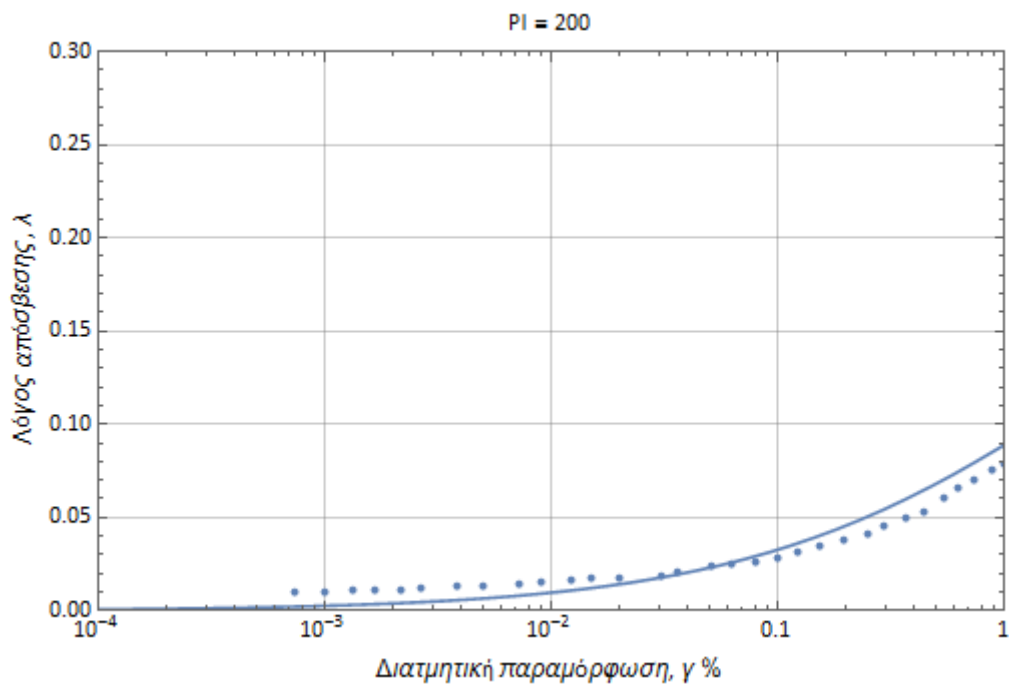


### 5.2.6 Διαγράμματα για δείκτη πλαστικότητας PI=200

Τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε στη διπλωματική εργασία είναι αυτή των εδαφών με πλαστικότητα ίση με διακόσια. Τα εδάφη αυτά κατατάσσονται στην κατηγορία πολύ μεγάλης πλαστικότητας, όπως και τα εδάφη που εξετάστηκαν στις υποενότητες 5.2.4 και 5.2.5. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα 5.25 και 5.26.



Διάγραμμα 5.25 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης διάτμησης-παραμόρφωσης για PI=200 με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα



Διάγραμμα 5.26 Απεικόνιση-σύγκριση της σχέσης λόγου απόσβεσης-παραμόρφωσης για  $PI=200$  με την καμπύλη του κώδικα sig3 και την αντίστοιχη από τα παλαιότερα πειράματα

Τα διαγράμματα 5.25 και 5.26 προέκυψαν από τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων  $\alpha, b$  και  $x_0$  του μοντέλου sig3, οι οποίες εμφανίζονται στον πίνακα 5.6.

Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για $PI=200$	
$\alpha$	1.1
$b$	- 0.755
$x_0$	- 0.009

Πίνακας 5.6 Τιμές των παραμέτρων του μοντέλου sig3 για δείκτη πλαστικότητας  $PI=200$

Παρατηρώντας τα διαγράμματα 5.25 και 5.26 γίνεται φανερό ότι υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των δύο καμπυλών και στα δύο, όμως στο διάγραμμα 5.25 αυτές εμφανίζονται μεγαλύτερες.

Πιο συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 5.25 οι δύο καμπύλες ταυτίζονται για ένα μικρό διάστημα, δηλαδή για παραμόρφωση μέχρι 0.08%. Στη συνέχεια, υπάρχει μία μικρή απόκλιση της τάξης του περίπου 3%. Για παραμόρφωση από 0.2% μέχρι 0.5% οι δύο καμπύλες ταυτίζονται και πάλι. Τέλος, για παραμόρφωση από 0.6% μέχρι 1% εμφανίζεται και πάλι κάποια απόκλιση. Η μέγιστη τιμή της είναι 10%.

Στο διάγραμμα 5.26 παρουσιάζονται αποκλίσεις μεταξύ των δύο καμπυλών σε δύο κομμάτια. Το πρώτο αντιστοιχεί σε παραμορφώσεις από 0.0007% μέχρι 0.02% και το δεύτερο κομμάτι σε παραμορφώσεις από 0.15% μέχρι 1%. Η μέση τιμή των αποκλίσεων σε αυτές τις δύο περιπτώσεις είναι αντίστοιχα 0.6% και 1%. Για παραμορφώσεις από 0.02% μέχρι 0.15% οι δύο καμπύλες ταυτίζονται.

Συγκρίνοντας και σε αυτή την περίπτωση τις αποκλίσεις των δύο διαγραμμάτων προκύπτει ότι η μέγιστη απόκλιση εμφανίζεται πάλι στο διάγραμμα του μέτρου διάτμησης (10%).

### 5.3 Αναλυτικότερες παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων

Σε αυτή την υποενότητα πραγματοποιείται πιο ενδελεχής ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

#### 5.3.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων

Εξετάζοντας κάθε ζεύγος διαγραμμάτων προκύπτει ότι σε κάθε περίπτωση η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών παρατηρείται στο διάγραμμα του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης με τη διατμητική παραμόρφωση και όχι σε αυτό του λόγου απόσβεσης. Μάλιστα οι αποκλίσεις των δύο καμπυλών στο διάγραμμα του μέτρου διάτμησης είναι πάντα κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του λόγου απόσβεσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται βέβαια και στο γεγονός ότι ο κατακόρυφος άξονας έχει διαφορετική διαβάθμιση στα δύο διαγράμματα. Στην πρώτη περίπτωση ο άξονας ξεκινάει από το μηδέν (0.0) και φτάνει στο ένα (1.0), ενώ στη δεύτερη ξεκινάει από το μηδέν και καταλήγει στο μηδέν κόμμα τριάντα (0.30). Ο οριζόντιος άξονας είναι κοινός και στα δύο διαγράμματα. Ξεκινάει από διατμητική παραμόρφωση 0.0001% και καταλήγει σε παραμόρφωση 1%.

Μελετώντας μόνο τα διαγράμματα του λόγου  $G/G_{max}$  με τη διατμητική παραμόρφωση προκύπτει ότι το εύρος των αποκλίσεων κυμαίνεται από περίπου 2% μέχρι 11%, που αποτελεί και τη μέγιστη παρατηρηθείσα τιμή.

Επίσης, προκύπτει ότι τα διαγράμματα του μέτρου διάτμησης με τη διατμητική παραμόρφωση παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά σε κάθε περίπτωση του δείκτη πλαστικότητας. Αυτή η συμπεριφορά συνοψίζεται στο ότι σε όλα αυτά τα διαγράμματα οι δύο καμπύλες ταυτίζονται στις μικρές τιμές των διατμητικών παραμορφώσεων και αρχίζουν να εμφανίζουν σταδιακά μικρότερες ή μεγαλύτερες αποκλίσεις στις μεγάλες τιμές των παραμορφώσεων.

Συγκριτικά από τα διαγράμματα του μέτρου διάτμησης αυτό με τη μικρότερη απόκλιση και επομένως αυτό που αποδίδει καλύτερα το ζητούμενο της εργασίας είναι το διάγραμμα 5.17, το οποίο αντιστοιχεί σε δείκτη πλαστικότητας ίσο με δεκαπέντε.

Οι μέγιστες τιμές απόκλισης, δηλαδή το 10% και 11% παρατηρούνται στα διαγράμματα 5.15, 5.23 και 5.25 τα οποία αντιστοιχούν σε πλαστικότητα ίση με μηδέν,εκατό και διακόσια αντίστοιχα. Ωστόσο, το διάγραμμα το οποίο κρίνεται λιγότερο κατάλληλο είναι το 5.15, δηλαδή αυτό που αντιπροσωπεύει το μηδενικό δείκτη πλαστικότητας. Αυτό δικαιολογείται γιατί σε αυτό το διάγραμμα οι αποκλίσεις εμφανίζονται για πολύ μεγαλύτερο εύρος των διατμητικών παραμορφώσεων, από ότι συμβαίνει στα διαγράμματα 5.23 και 5.24.

Απομονώνοντας τώρα τα διαγράμματα του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση προκύπτει ότι το εύρος των αποκλίσεων σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο των αρχικών διαγραμμάτων, δηλαδή από 0.1% μέχρι 1%. Αυτό βέβαια δικαιολογείται όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Επιπρόσθετα, γίνεται φανερό ότι η συμπεριφορά αυτών των διαγραμμάτων μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες.

- Στην πρώτη κατηγορία ανήκει το διάγραμμα 5.16, δηλαδή αυτό που αντιστοιχεί στο δείκτη πλαστικότητας ίσο με το μηδέν. Αυτό είναι και το μόνο διάγραμμα στο οποίο δεν υπάρχει ταύτιση των δύο καμπυλών σε κανένα κομμάτι των παραμορφώσεων.
- Στη δεύτερη κατηγορία συγκαταλέγονται τα διαγράμματα 5.18 και 5.20, δηλαδή αυτά που προέκυψαν για δείκτες πλαστικότητας δεκαπέντε και τριάντα αντίστοιχα. Η συμπεριφορά αυτών των δύο διαγραμμάτων είναι ότι υπάρχει ταύτιση των δύο καμπυλών στις μικρές παραμορφώσεις και στις μεγαλύτερες εμφανίζονται σταδιακά αποκλίσεις. Η συμπεριφορά αυτή είναι παρόμοια με αυτή που συνολικά παρουσιάζουν τα διαγράμματα του μέτρου απόσβεσης.
- Στην τρίτη και τελευταία κατηγορία ανήκουν τα διαγράμματα 5.22, 5.24 και 5.26, δηλαδή αυτά που αντιπροσωπεύουν τους δείκτες πλαστικότητας πενήντα, εκατό και εκατόν είκοσι αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση οι δύο καμπύλες των διαγραμμάτων ταυτίζονται για μικρό σχετικά εύρος των παραμορφώσεων στη μέση περίπου του διαγράμματος. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται εμφανίζονται στις αρχικές μικρές παραμορφώσεις και στις τελικές μεγαλύτερες.

Από τα διαγράμματα του λόγου απόσβεσης αυτό που εμφανίζει τις μικρότερες αποκλίσεις είναι το 5.22, αυτό που αντιστοιχεί δηλαδή σε δείκτη πλαστικότητας ίσο με πενήντα. Βέβαια στην περίπτωση των διαγραμμάτων του λόγου απόσβεσης, γίνεται κατανοητό ότι όλα παρουσιάζουν μικρές σχετικά αποκλίσεις.

Το διάγραμμα το οποίο ικανοποιεί λιγότερο τους στόχους της εργασίας είναι το 5.16 που αντιστοιχεί σε δείκτη πλαστικότητας ίσο με το μηδέν. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο διάγραμμα αυτό δεν παρατηρείται πουθενά ταύτιση μεταξύ των καμπυλών.

### 5.3.2 Σχολιασμός των παραμέτρων του μοντέλου

Εξετάζοντας τις παραμέτρους που κρίθηκαν κατάλληλες για κάθε περίπτωση πλαστικότητας προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις.

Αρχικά όλες οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν είναι δεκαδικοί αριθμοί οι οποίοι δεν ξεπερνούν την τιμή 2.0. Εμφανίζονται και αρνητικές τιμές που δεν είναι μικρότερες από το -0.9.

Το εύρος των τιμών της παραμέτρου  $a$  χαρακτηρίζεται μικρό με τις τιμές του να κυμαίνονται από 1.09 μέχρι 1.14. Στις περιπτώσεις που αφορούν εδάφη με δείκτη πλαστικότητας δεκαπέντε, τριάντα και διακόσια η τιμή της παραμέτρου  $a$  παραμένει η ίδια, δηλαδή 1.1. Επιπλέον, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι όλες οι τιμές έχουν θετικό πρόσημο.

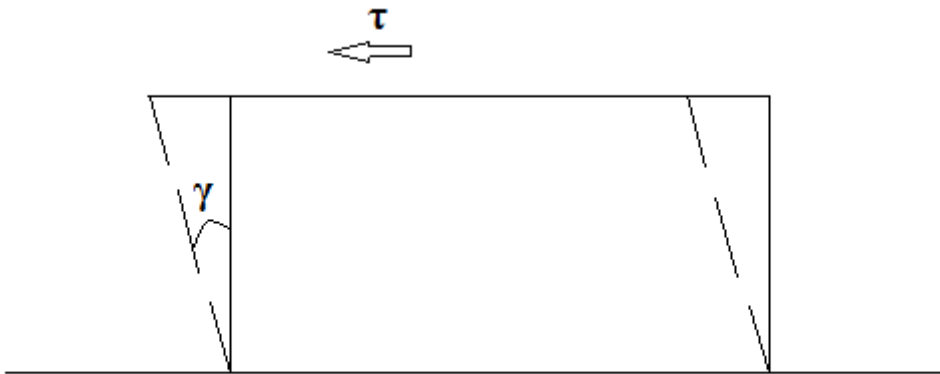
Οι τιμές της παραμέτρου  $b$  εμφανίζονται με αρνητικό πρόσημο. Το εύρος τους σε απόλυτη τιμή είναι από 0.66 μέχρι 0.87. Η τιμή -0.66 αντιστοιχεί στα διαγράμματα με δείκτη πλαστικότητας ίσο με το μηδέν. Στη συνέχεια οι τιμές της παραμέτρου σταδιακά μειώνονται μέχρι και για πλαστικότητα ίση με εκατό. Εκεί συναντάται και η μικρότερη τιμή, δηλαδή το -0.87. Στην περίπτωση των διαγραμμάτων με δείκτη πλαστικότητας ίσο με διακόσια η τιμή είναι -0.755.

Οι τιμές της παραμέτρου  $x_0$  έχουν αρνητικό πρόσημο. Το εύρος τους κυμαίνεται σε απόλυτη τιμή από 0.009 μέχρι 1.57. Η μικρότερη τιμή, δηλαδή το -1.57 αντιστοιχεί στα διαγράμματα με πλαστικότητα ίση με το μηδέν. Προχωρώντας στις επόμενες περιπτώσεις οι τιμές της παραμέτρου  $x_0$  σταδιακά αυξάνονται, με την μέγιστη, δηλαδή το -0.009 να παρατηρείται στα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε πλαστικότητα ίση με διακόσια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.1 Εφαρμογή των αποτελεσμάτων σε δοκιμή απλής διάτμησης

Στο παρόν κεφάλαιο τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν νωρίτερα εφαρμόζονται σε ένα παράδειγμα που περιλαμβάνει δοκιμή απλής διάτμησης για να γίνει περισσότερο κατανοητή η χρησιμότητά τους. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή περιλαμβάνει ένα εδαφικό δοκίμιο με συγκεκριμένες ιδιότητες το οποίο υποβάλλεται σε ανακυκλική δοκιμή απλής διάτμησης. Το δοκίμιο φαίνεται στο σχήμα 6.1, όπου με  $\tau$  συμβολίζεται η διατμητική τάση και με  $\gamma$  η διατμητική παραμόρφωση.



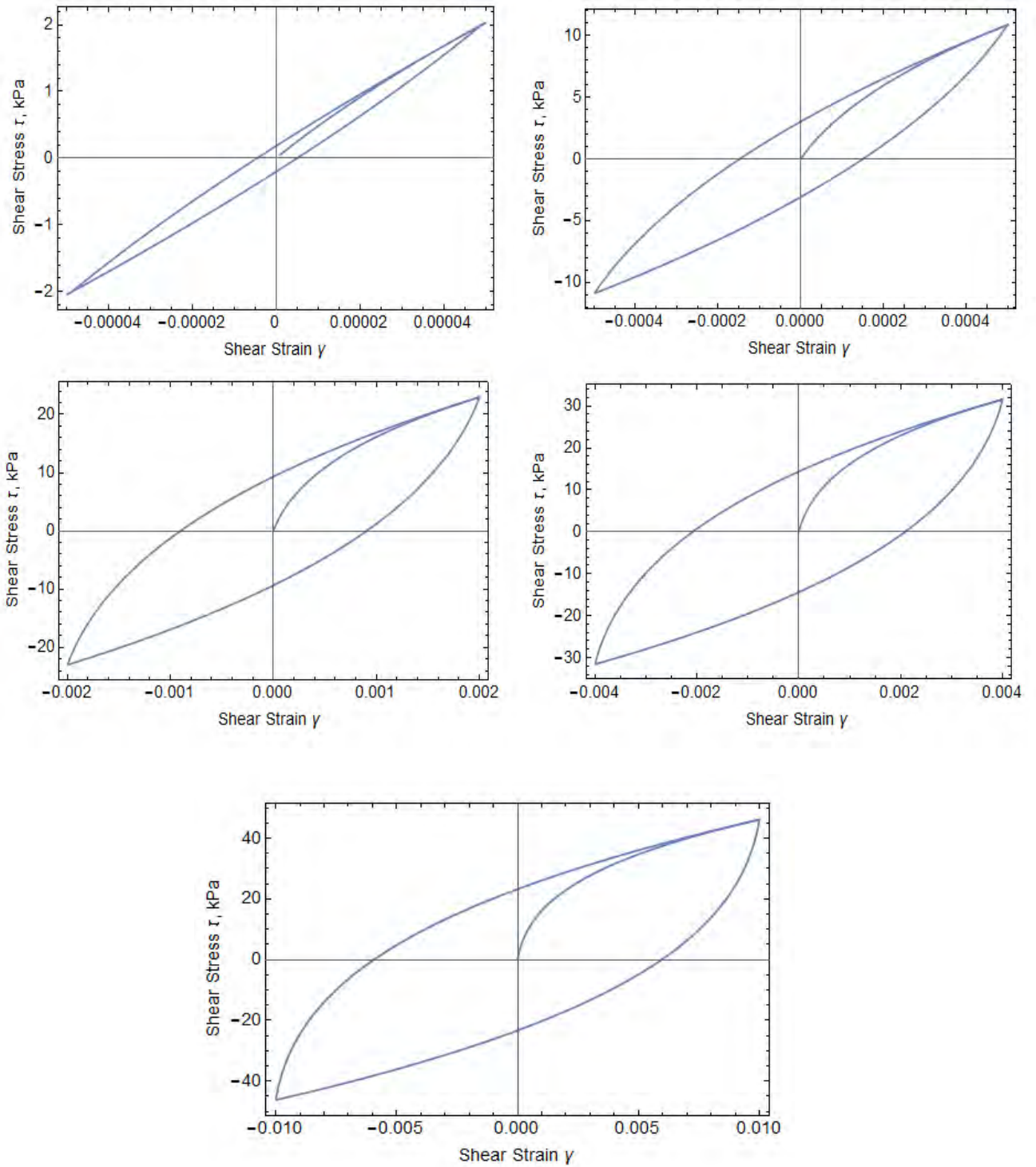
Σχήμα 6.1 Δοκίμιο σε απλή διάτμηση

Το παράδειγμα πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα FLAC, μέσω ενός κώδικα ο οποίος βρίσκεται στο παράρτημα του τεύχους.

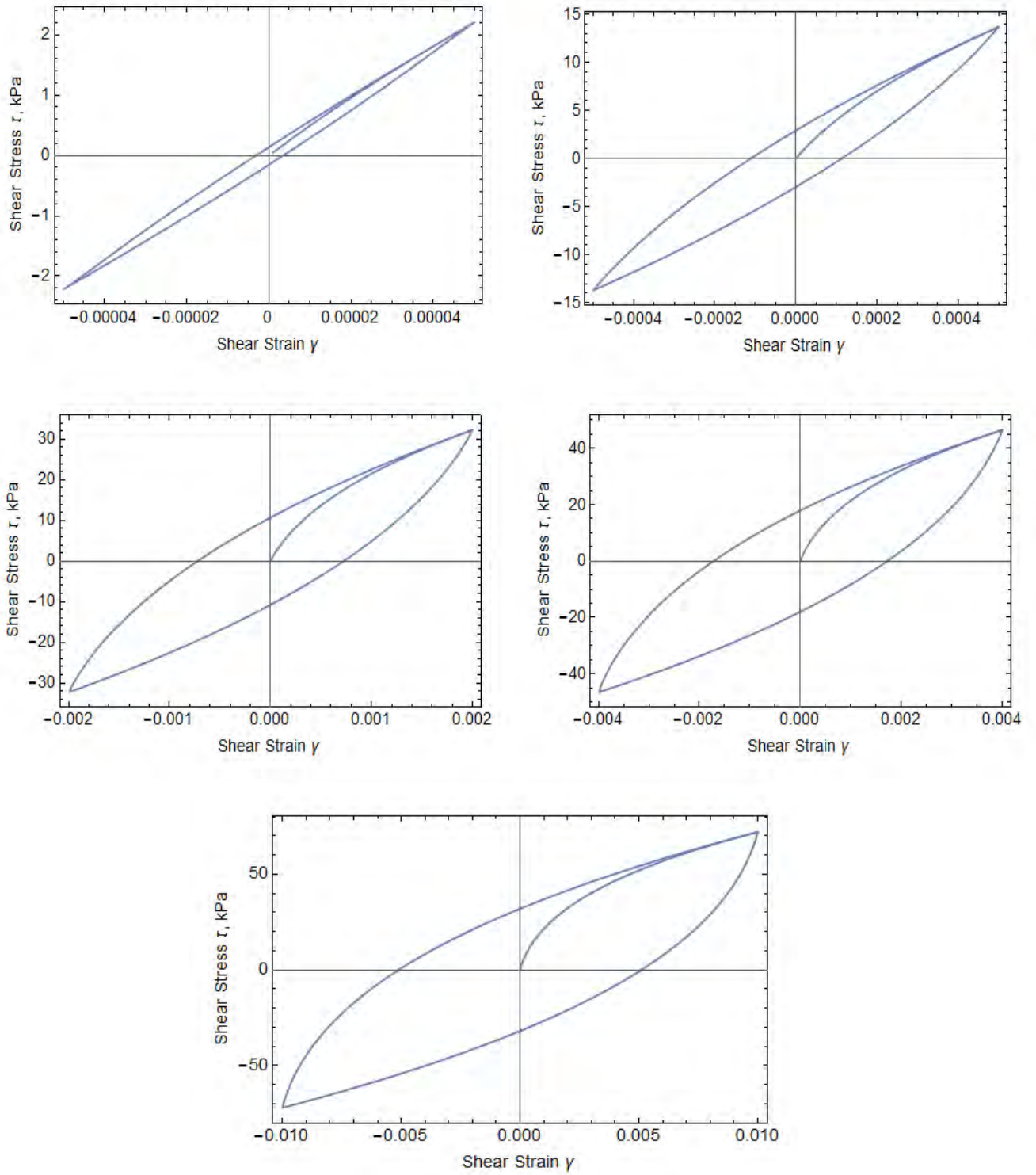
Ο κώδικας περιλαμβάνει το μη γραμμικό υστερητικό μοντέλο sig3, του οποίου οι παράμετροι για κάθε δείκτη πλαστικότητας βρέθηκαν στο κεφάλαιο 5. Υποθέτοντας ότι το δοκίμιο έχει κάθε φορά διαφορετική πλαστικότητα, αποδόθηκαν στον κώδικα οι αντίστοιχες τιμές των κατάλληλων συνιστωσών. Επιπλέον, το πρόγραμμα λειτουργεί δίνοντας κάθε φορά διαφορετικό αριθμό βημάτων επίλυσης. Τα βήματα επίλυσης αντιπροσώπευουν το εύρος των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέχθηκαν πέντε τιμές βημάτων επίλυσης οι οποίες είναι 50, 500, 2000, 4000 και 10000. Έτσι, για κάθε περίπτωση του δείκτη πλαστικότητας εφαρμόστηκε ο κώδικας πέντε φορές για τις πέντε διαφορετικές τιμές των βημάτων επίλυσης. Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν περιλαμβάνουν τη σχέση μεταξύ των τάσεων και των παραμορφώσεων και τη σχέση της διατμητικής παραμόρφωσης και της διατμητικής τάσης με το χρόνο. Τα διαγράμματα των τάσεων σε σχέση με τις παραμορφώσεις προήλθαν συνδυάζοντας τα αντίστοιχα διαγράμματα των τάσεων και των παραμορφώσεων σε σχέση με το χρόνο. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν οι βρόγχοι που εμφανίζονται στα διαγράμματα των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Τα διαγράμματα που εμφανίζουν τα αποτελέσματα της σχέσης της διατμητικής παραμόρφωσης με τη διατμητική τάση παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως ένα σχήμα που περιλαμβάνει και τις πέντε περιπτώσεις των βημάτων επίλυσης. Το πρώτο διάγραμμα αντιστοιχεί στα 50 βήματα και αντίστοιχα τα υπόλοιπα στα 500, 2000, 4000 και 10000. Ενδεικτικά στο παράρτημα βρίσκονται κάποια διαγράμματα που εμφανίζουν τη σχέση της διατμητικής τάσης και της διατμητικής παραμόρφωσης με το χρόνο.

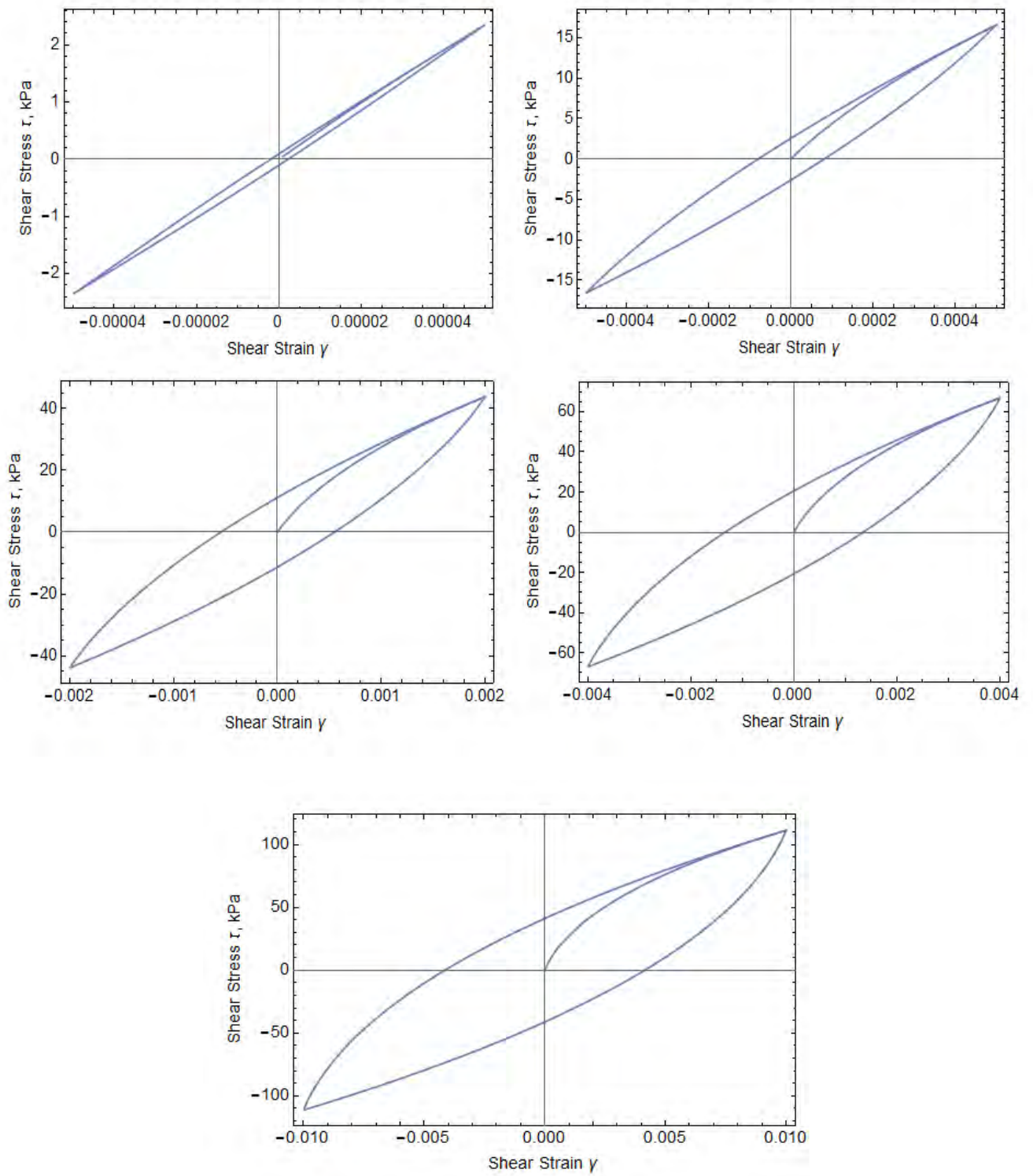




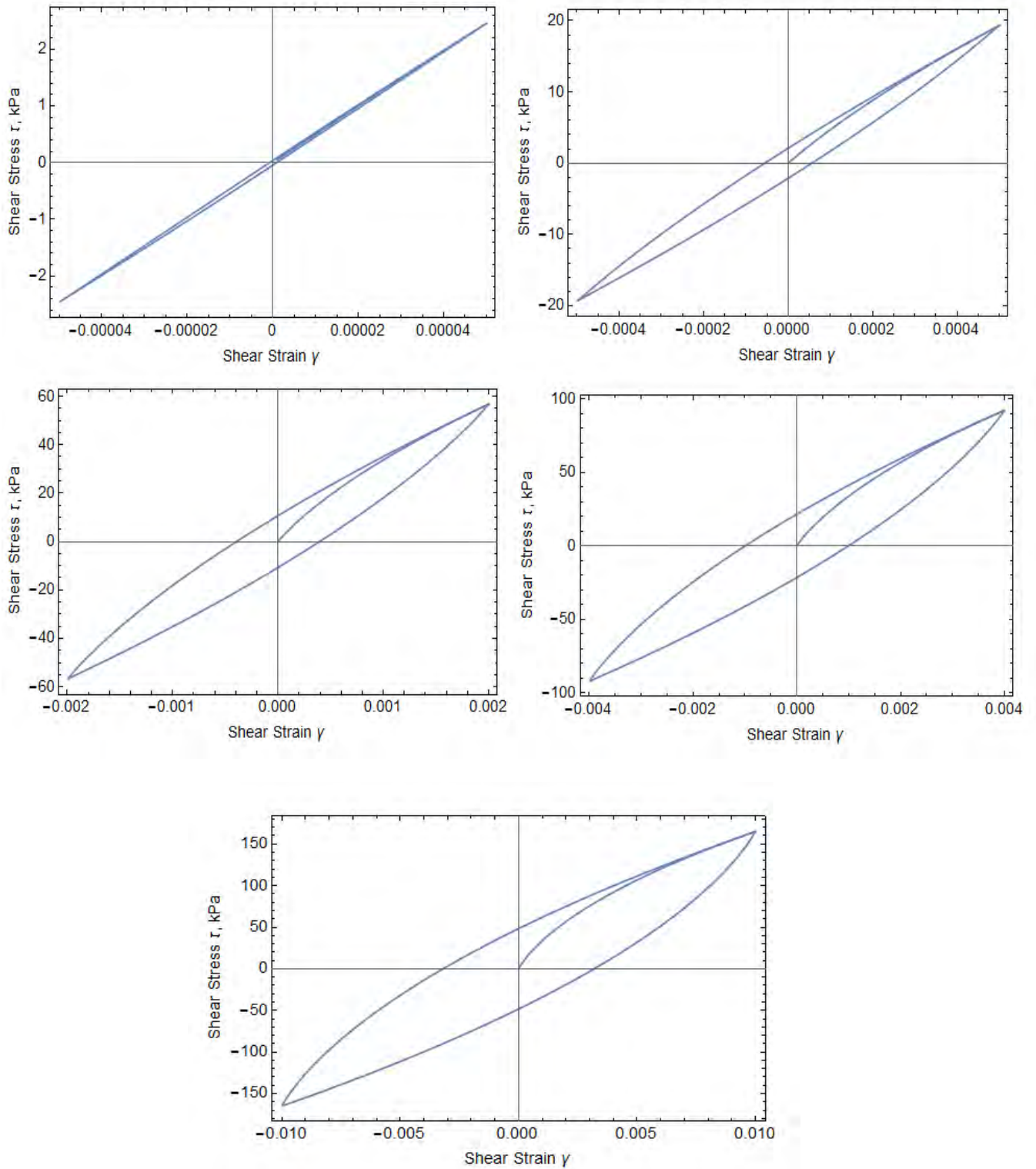
Σχήμα 6.2 Η σχέση της διατμητικής τάσης με την παραμόρφωση για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=0$



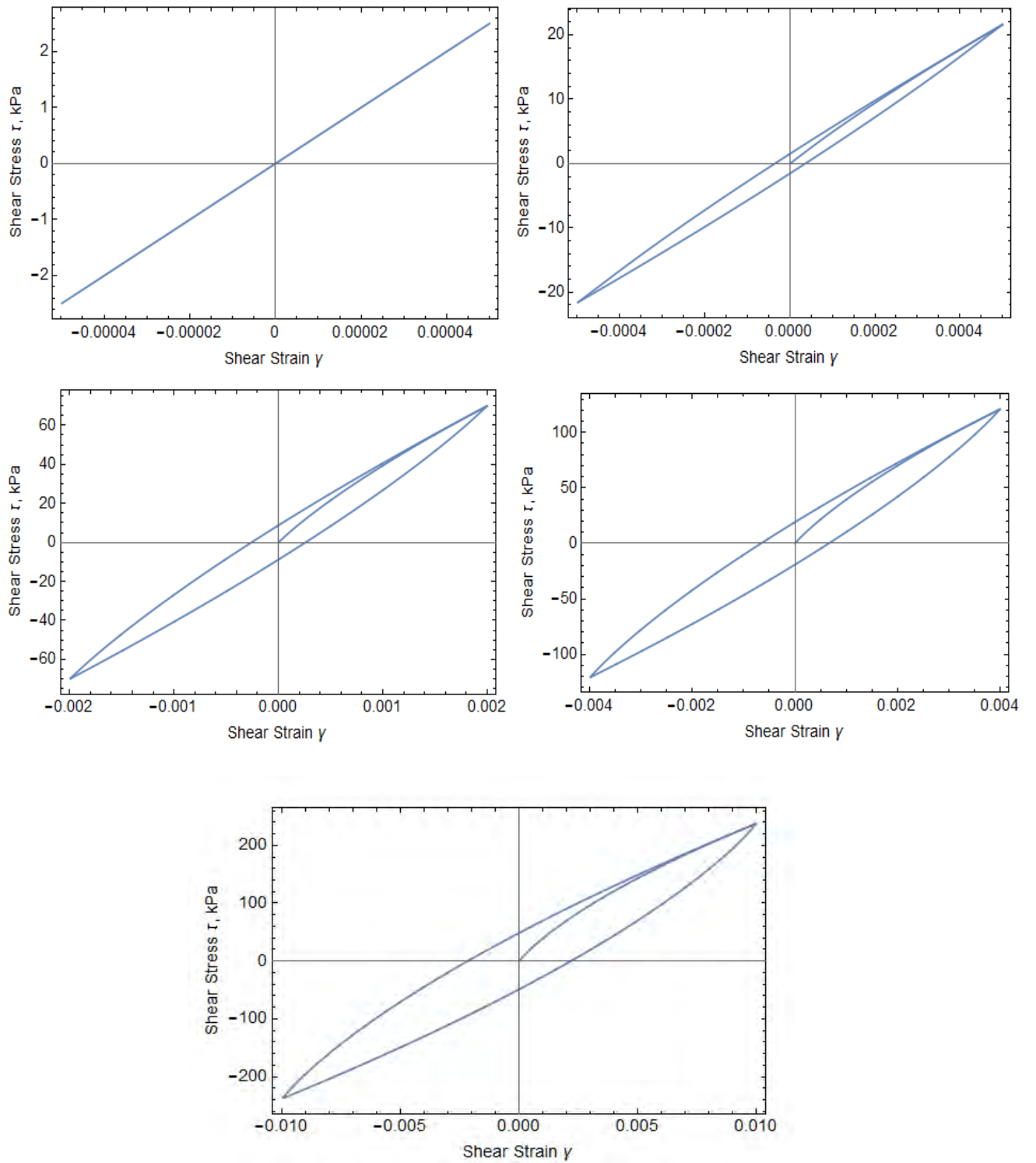
Σχήμα 6.3 Η σχέση της διατμητικής τάσης με την παραμόρφωση για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=15$



Σχήμα 6.4 Η σχέση της διατμητικής τάσης με την παραμόρφωση για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=30$

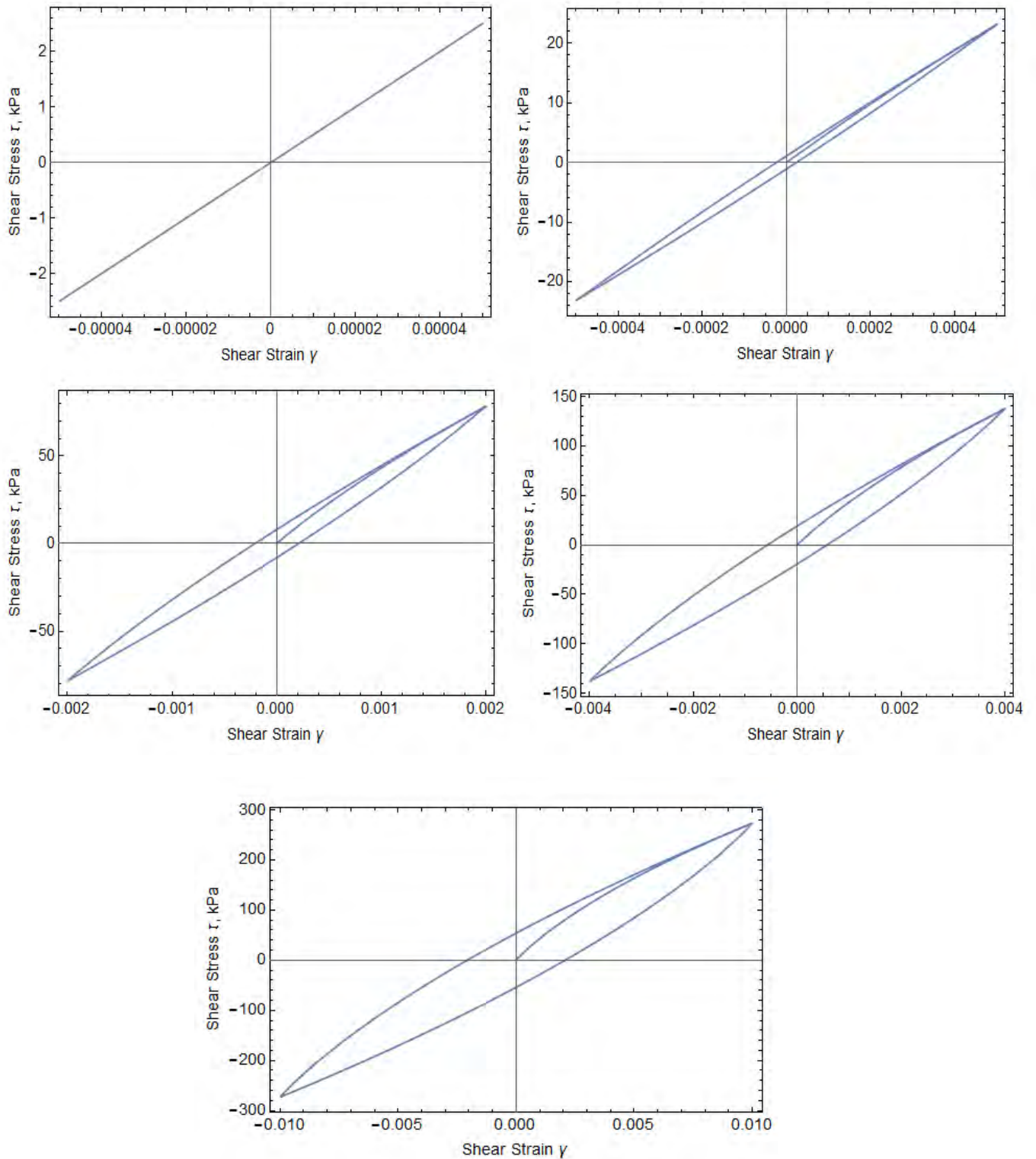


Σχήμα 6.5 Η σχέση της διατμητικής τάσης με την παραμόρφωση για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=50$



Σχήμα 6.6 Η σχέση της διατμητικής τάσης με την παραμόρφωση για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=100$





Σχήμα 6.7 Η σχέση της διατμητικής τάσης με την παραμόρφωση για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=200$

Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι αξίζει να τονιστούν τα εξής στοιχεία:

Συνολικά γίνεται φανερό ότι για όλες τις διαφορετικές τιμές του δείκτη πλαστικότητας οι βρόγχοι που δημιουργούνται από την επίλυση τείνουν να γίνονται μεγαλύτεροι καθώς αυξάνονται τα βήματα επίλυσης. Αντίστοιχα, αυξάνεται το εύρος των διατμητικών παραμορφώσεων, καθώς και οι διατμητικές τάσεις.

Όταν τα βήματα είναι 50 οι τιμές των παραμορφώσεων κυμαίνονται από  $-0.00005$  μέχρι  $+0.00005$ . Αυξάνοντας τα βήματα σε 500 το εύρος των διατμητικών παραμορφώσεων αυξάνεται και είναι από  $-0.0005$  μέχρι  $+0.0005$ . Όταν τα βήματα γίνουν ίσα με 2000 τότε η παραμόρφωση κυμαίνεται από  $-0.002$  μέχρι  $+0.002$ . Στη συνέχεια, τα βήματα επίλυσης αυξάνονται σε 4000 και έτσι οι παραμορφώσεις είναι από  $-0.004$  μέχρι  $+0.004$ . Τέλος, όταν τα βήματα φτάνουν τα 10000, οι παραμορφώσεις κυμαίνονται από  $-0.01$  μέχρι  $+0.01$ .

Οι παραπάνω τιμές των παραμορφώσεων ισχύουν για κάθε περίπτωση πλαστικότητας.

Επιπλέον, προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται ο δείκτης πλαστικότητας οι βρόγχοι που αντιστοιχούν στον ίδιο αριθμό βημάτων σταδιακά μικραίνουν. Για παράδειγμα στο σχήμα 6.2 που αντιστοιχεί στο μηδενικό δείκτη πλαστικότητας ο βρόγχος που σχηματίστηκε για τα 500 βήματα επίλυσης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο που δημιουργήθηκε για δείκτη πλαστικότητας ίσο με δεκαπέντε και φαίνεται στο σχήμα 6.3. Σταδιακά μικραίνουν έτσι όλοι οι βρόγχοι, μέχρι και την τελευταία περίπτωση, η οποία φαίνεται στο σχήμα 6.7 και αντιπροσωπεύει την πλαστικότητα ίση με διακόσια.

Στα σχήματα 6.6 και 6.7 παρατηρείται ότι στην περίπτωση που τα βήματα επίλυσης είναι ίσα με 50, δεν σχηματίζεται κανένας βρόγχος αλλά αντίθετα προκύπτει μία ευθεία γραμμή. Αυτό ουσιαστικά φανερώνει τη γραμμική συμπεριφορά των εδαφών σε αυτό το εύρος των παραμορφώσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### 7.1 Συμπεράσματα

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσα από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας εξάχθηκαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα τα οποία συνοψίζονται παρακάτω.

Όσον αφορά τη λειτουργία του μοντέλου έγινε σαφές μέσα από την όλη διαδικασία ότι οι παράμετροί του επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο τις καμπύλες που δημιουργήθηκαν για τα δύο ξεχωριστά είδη των διαγραμμάτων που εξετάστηκαν.

Πιο συγκεκριμένα αποδείχτηκε ότι η παράμετρος  $a$  επιδρά μόνο στο διάγραμμα του μέτρου διάτμησης με τη διατμητική παραμόρφωση καθώς παίρνει διαφορετικές τιμές. Αντίθετα, δεν παρατηρείται καμία επίδραση πάνω στα διαγράμματα του λόγου απόσβεσης με την παραμόρφωση. Ακόμα και στην περίπτωση που αποδίδεται κάποια ακραία τιμή στην παράμετρο  $a$ , η καμπύλη του διαγράμματος του λόγου απόσβεσης δεν αλλάζει καθόλου.

Οι άλλες δύο παράμετροι, δηλαδή οι  $b$  και  $\chi_0$  επηρεάζουν εξίσου τη μορφή των καμπυλών και στα δύο είδη διαγραμμάτων.

Ουσιαστικά και οι τρεις παράμετροι επιδρούν στην καμπυλότητα και στην κλίση των καμπυλών των διαγραμμάτων. Επιπρόσθετα, επηρεάζουν την παραλληλία που εμφανίζουν οι καμπύλες του μοντέλου σε σχέση με αυτές που προυπήρχαν.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5 και μελετώντας εκ νέου τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων προκύπτει ότι τα ζευγάρια διαγραμμάτων που ικανοποιούν καλύτερα τους στόχους της εργασίας είναι τα 5.19, 5.20 και τα 5.21,5.22, δηλαδή αυτά που αντιπροσωπεύουν δείκτες πλαστικότητας ίσους με τριάντα και πενήντα αντίστοιχα. Τα διαγράμματα αυτά έχουν παρόμοια συμπεριφορά και οι αποκλίσεις που εμφανίζουν είναι σχεδόν οι ίδιες.

Το ζευγάρι διαγραμμάτων που ικανοποιεί λιγότερο το σκοπό της εργασίας είναι το 5.15 και 5.16, δηλαδή αυτό που αντιστοιχεί σε πλαστικότητα ίση με το μηδέν.

Κρίνοντας συνολικά τη λειτουργία του μοντέλου μέσα από τα αποτελέσματα που έδωσε μπορεί να χαρακτηριστεί ως αρκετά αξιόπιστο. Οι καμπύλες που δημιουργήθηκαν εμφανίστηκαν πολύ κοντά, σχεδόν ταυτίζονταν με αυτές των προηγούμενων πειραμάτων, γεγονός που ικανοποιεί τους στόχους της εργασίας. Βέβαια η όλη διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα καθώς είναι δύσκολο να επιλέξεις τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων, οι οποίες θα αποδώσουν τα σωστά αποτελέσματα.



Αξιοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων στο παράδειγμα του κεφαλαίου 6 έγινε ξεκάθαρη η χρησιμότητά τους στα προβλήματα δυναμικής ανάλυσης, όπως είναι αυτά που εμπεριέχουν σεισμικές φορτίσεις. Ταυτόχρονα επιβεβαιώθηκε ότι τα εδάφη με μεγάλη πλαστικότητα παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά στις πολύ μικρές παραμορφώσεις.

## 7.2 Προτάσεις

Το κομμάτι το οποίο δεν αποδώθηκε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο είναι ίσως τα διαγράμματα των εδαφών που έχουν δείκτη πλαστικότητας ίσο με το μηδέν. Αυτό είναι ένα βαρύ αρνητικό του μοντέλου καθώς πολλά εδάφη ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ένα ανάλογο εγχείρημα το άλλο μοντέλο που ανήκει στο πρόγραμμα FLAC και χρησιμοποιείται στις δυναμικές αναλύσεις και ονομάζεται sig4. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από τέσσερις συνιστώσες και ίσως να έδινε καλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα, διορθώνοντας τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στη μηδενική πλαστικότητα και βελτιώνοντας τις μικρές ατέλειες των υπόλοιπων περιπτώσεων.

Τέλος, προκειμένου να μειωθεί και ο χρόνος εκτέλεσης θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα το οποίο θα τρέχει δίνοντας τιμές στις αντίστοιχες παραμέτρους μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτελέσματα. Στην προκειμένη περίπτωση να ταυτιστούν οι δύο καμπύλες των διαγραμμάτων του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anderson, D. G. and Richard, F. E., Jr (1976). "Effects of straining on shear modulus of clays." *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, 102(9), 975-987.

Anderson, D. G. and Stokoe, K. H., II. (1978). "Shear modulus: A time-dependent soil property." *Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP654*, 66-90.

Dobry, R., and Vucetic, M. (1987). "State-of-the-art report: Dynamic properties and response of soft clay deposits." *Proc. Int. Symp. on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Vol. 2, 51-87.

FLAC Manual, Version 7.0, *Itasca Consulting Group. Inc*, Minnesota, USA.

Hardin, B. O. (1978). "The nature of stress-strain behavior for soils." *Proc. ASCE Geotech. Engrg. Div. Specialty Conf. on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol. 1, 3-90.

Hardin, B. O., and Black W. L. (1968). "Vibration modulus of normally consolidated clay." *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 94(2), 353-369.

Ishihara, K. (1986). "Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis." *Geomechanical Modelling in Engineering Practice*, R. Dingar and J. A. Studer, eds., A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 241-275.

Ishihara, K. (1997). "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics." Oxford Science Publications, Oxford Engineering Science Series 46.

Kim, T. C., and Novak, M. (1981). "Dynamic properties of some cohesive soils of Ontario." *Can. Geotech. J.* , 18 (3), 371-389.

Kokusho, T., Yoshida, Y., and Esashi, Y. (1982). "Dynamic properties of soft clay for wide strain range." *Soils Found.*, 22(4), 1-18.

Masing, G. (1926) Eigenspannungen and Verfertigung beim Messing. In *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Congress on Applied Mechanics*, Zurich, Switzerland.

Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1970). "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses." *Report No. EERC 70-10*, Univ. of California, Berkeley, Calif.

Stokoe, K. H., II. (1980). "Field measurement of dynamic soil properties." *Proc. Of Second Conf. on Civil Engineering and Nuclear Power, Vol. II: Geotechnical Topics*, ASCE, 7-1-1–7-1-31.

Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117, 89-107.

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γκαζέτας Γ. “Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής.”, Έκδοση 2002, Τομέας Γεωτεχνικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

Παπαχαρίσης Ν., Γραμματικόπουλος Ι., Μάνου-Ανδρεάδη Ν. “Γεωτεχνική Μηχανική Έρευνα-Γεωτρήσεις-Εργαστήριο.”, Κεφάλαιο 5, Β’ Έκδοση 1999, Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη α.ε.

Πιτιλάκης Κ. Δ. “Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική.”, Εκδόσεις Ζήτη.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω επισυνάπτονται οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν στα προγράμματα Mathematica και FLAC αντίστοιχα, για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα κεφάλαια πέντε και έξι της εργασίας.

### Πρόγραμμα Mathematica

```
clear [τ0, τ1, τ2, Damping, Gs]
a=.
b=.
xo=.
G0=.
γref=.
τref=G0 a/(1+Exp[-(Log[10, γref]-xo)/b])γref;

τ0[γ_]:= (G0 a)/(c+Exp[-(Log[10, γ]-xo)/b])γ
τ1[γ_]:= (G0 a)/(c+Exp[-(Log[10, Abs[(γ-γref)/2]]-xo)/b]) (γ-γref)+τref
τ2[γ_]:= (G0 a)/(c+Exp[-(Log[10, Abs[(γ+γref)/2]]-xo)/b]) (γ+γref)-τref

Gs[γ_]:= a/c+Exp[-(Log[10, γ]-xo)/b]

Damping[γc_]:= Block[{}],

γref=γc;

τref=G0 a/(c+Exp[-(Log[10, γref]-xo)/b])γref;

ΔE=NIntegrate[τ2[γ]-τ1[γ], {γ, -γref, γref}];

E1=0.5τrefγref;

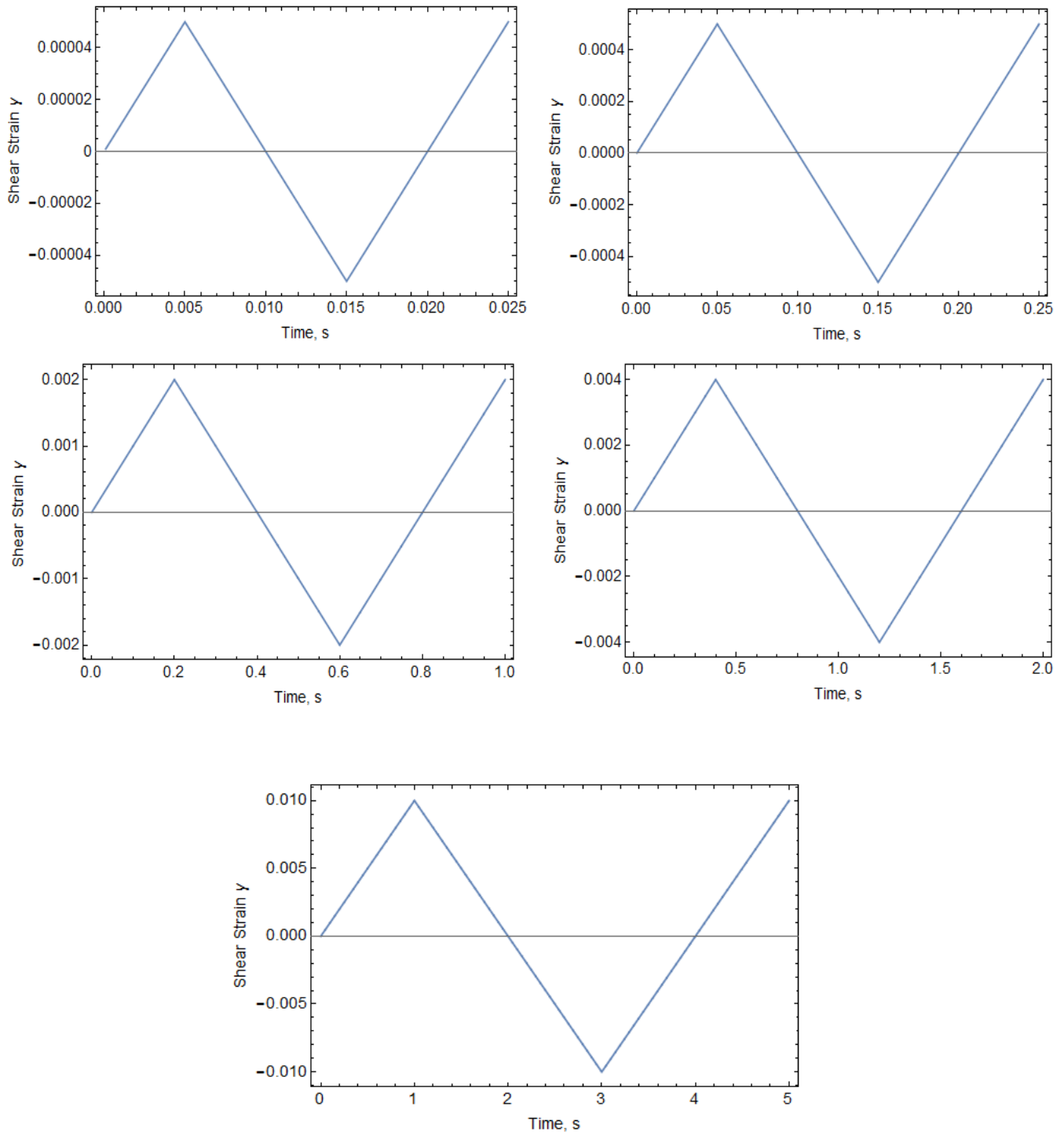
ξ=(ΔE/4πE1)//N]
```

## Πρόγραμμα FLAC

```
new
conf dyn
grid 1 1
model elas
prop dens 2000 shear 50e6 bulk 100e6
; hysteretic damping model sig3
ini dy_damp hyst sig3 1.09 -0.66 -1.57
set dydt 1e-4
; histories
fix x y
his dytime
his sxy i 1 j 1
his xdis i 1 j 2
his nstep 1
def cs
cs0=2000
cs1=2*cs0
end
cs
ini xvel 1e-2 j=2
cyc cs0
ini xvel mul -1
cyc cs1
ini xvel mul -1
cyc cs1
;
;*****
;
```

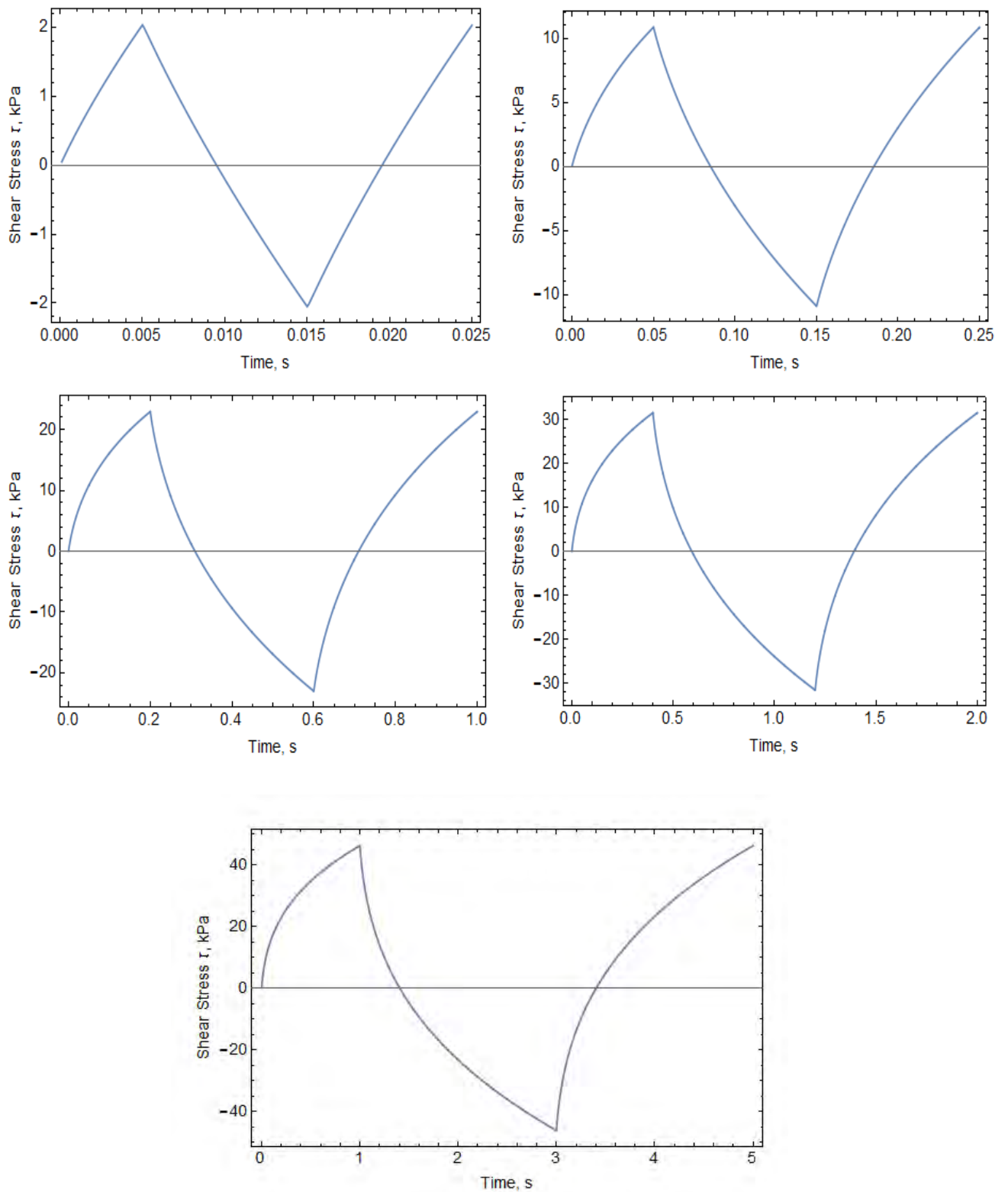
```
; delete previous files
sys delete stress_time.dat
sys delete strain_time.dat
sys delete stress_strain.dat
;
;*****
; write new files files
set hisfile stress_time.dat
his write 2 vs 1
set hisfile strain_time.dat
his write 3 vs 1
set hisfile stress_strain.dat
his write 2 vs 3
save results.sav
```

Παρακάτω εμφανίζονται ενδεικτικά κάποια διαγράμματα που περιλαμβάνουν τη σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και της διατμητικής παραμόρφωσης με το χρόνο, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του κεφαλαίου έξι.

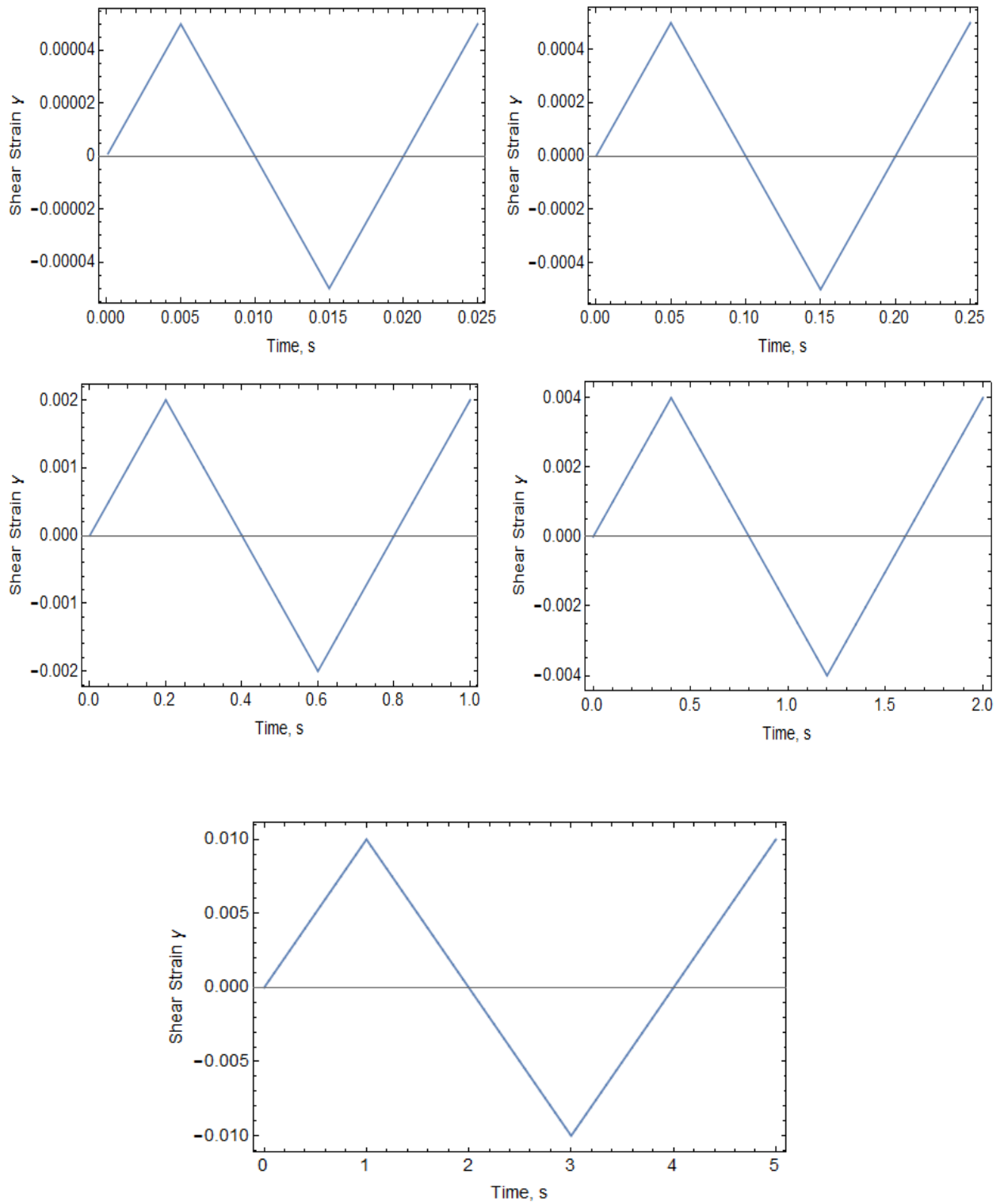


Σχήμα Π.1 Η σχέση της διατμητικής παραμόρφωσης με τον χρόνο για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=0$

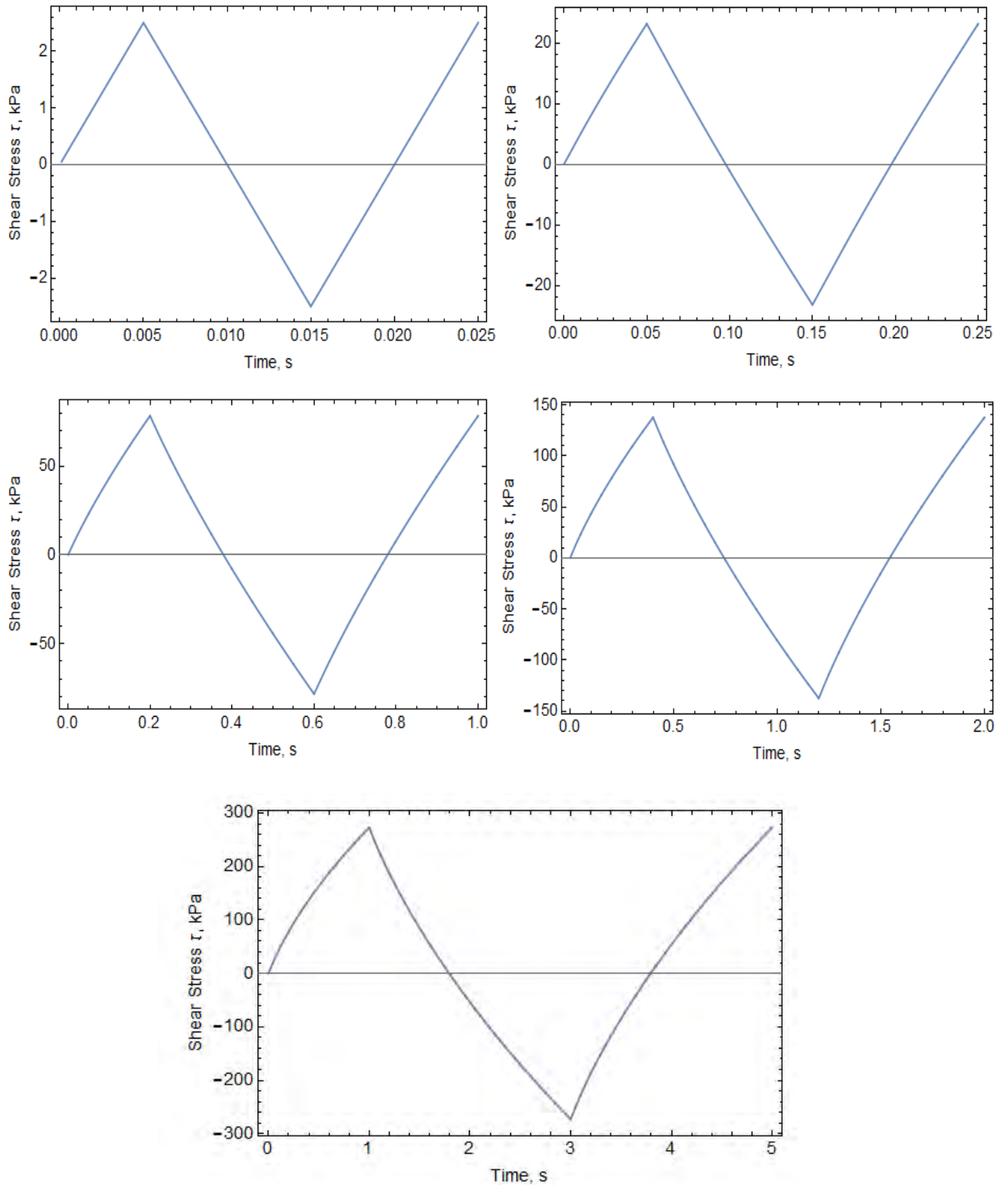




Σχήμα Π.2 Η σχέση της διατμητικής τάσης με τον χρόνο για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=0$



Σχήμα Π.3 Η σχέση της διαμητικής παραμόρφωσης με τον χρόνο για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=200$



Σχήμα Π.2 Η σχέση της διατμητικής τάσης με τον χρόνο για τις 5 περιπτώσεις βημάτων επίλυσης και για δείκτη πλαστικότητας  $PI=200$